



# **Analýza vlivu mechanických vlastností materiálu na lisovatelnost dílů v automobilovém průmyslu**

## **Diplomová práce**

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály  
*Autor práce:* **Bc. Jan Čechlovský**  
*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.





## Zadání diplomové práce

# Analýza vlivu mechanických vlastností materiálu na lisovatelnost dílů v automobilovém průmyslu

*Jméno a příjmení:* **Bc. Jan Čechlovský**  
*Osobní číslo:* **S17000247**  
*Studijní program:* **N2301 Strojní inženýrství**  
*Studijní obor:* **Strojírenská technologie a materiály**  
*Zadávací katedra:* **Katedra strojírenské technologie**  
*Akademický rok:* **2018/2019**

### Zásady pro vypracování:

1. Základy technologie hlubokého tažení, materiály používané v konstrukci karoserie automobilu.
2. Mechanické zkoušky pro hodnocení tvárnosti tenkých ocelových plechů (statická zkouška tahem, FLC diagramy, zkouška rozšiřováním, tribologické testy atd.).
3. Experimentální zjištění mechanických vlastností hlubokotažných materiálů.
4. Vyhodnocení, diskuze.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy  
Rozsah pracovní zprávy: cca 50  
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



### Seznam odborné literatury:

- [1] KUHN, H., D. MEDLIN, ed. *ASM HANDBOOK Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [2] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
- [3] SEMIATIN, S. L. ed. *ASM HANDBOOK Volume 14B – Metalworking: Sheet Forming*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2006. s. 924. ISBN-10: 0-87170-710-1.
- [4] NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M., KRÍŽ, O. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. 2. rozš. vydání. Praha: Grada, 2016. s. 278. ISBN 978-80-247-5786-5.
- [5] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

2. 5. 2019

Bc. Jan Čechlovský

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. a konzultantovi doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jejich cenné rady a čas, který mi věnovali při tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu při studiu.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21286 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

**Název diplomové práce:**

Analýza vlivu mechanických vlastností materiálu na lisovatelnost dílů v automobilovém průmyslu

**Anotace**

Cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv mechanických vlastností materiálu na jeho lisovatelnost. V teoretické části práce jsou uvedeny základní technologické zkoušky, vlivy na tvářitelnost materiálu a způsoby měření FLC diagramů. V experimentální části byly provedeny vybrané technologické zkoušky pro porovnání zkoumaných materiálů. Naměřené hodnoty byly následně vyhodnoceny.

**Klíčová slova**

hlubokotažná ocel, IF ocel, technologické zkoušky, tvářitelnost, FLC diagramy

**Title of the thesis:**

Analysis of the Influence of Mechanical Material Properties on the Compressibility of Components in Automotive Industry

**Abstract**

The aim of the thesis was to evaluate the influence of mechanical material properties on its compressibility. In the theoretical part basic technological tests, influences on the material formability and ways of measuring FLC diagrams are presented. In the experimental part selected technological tests for comparing the examined materials were executed. Afterwards, the acquired data was interpreted.

**Key words**

deep-drawable steel, IF steel, technological tests, formability, FLC diagram

## Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
1 Úvod .....	10
2 Teoretická část .....	11
2.1 Základy technologie hlubokého tažení.....	11
2.2 Materiály používané pro hluboké tažení .....	13
2.2.1 IF oceli.....	14
2.2.2 IF ocel s BH efektem .....	14
2.3 Tvářitelnost .....	14
2.3.1 Anizotropie .....	15
2.3.1.1 Normálová anizotropie .....	15
2.3.1.2 Plošná Anizotropie .....	16
2.3.2 Stárnutí materiálu a jeho vliv na tvářitelnost .....	17
2.3.3 Vliv tření.....	18
2.3.3.1 Hodnocení povrchu .....	20
2.4 Statická zkouška tahem.....	20
2.5 Technologické zkoušky tvářitelnosti .....	24
2.5.1 Zkouška hloubení dle Erichsena .....	24
2.5.2 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa .....	25
2.5.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška) .....	26
2.5.4 Zkouška hlubokým tahem a přetržením .....	27
2.5.5 Kalíškovací zkouška AEG .....	27
2.5.6 Hydraulická zkouška .....	27
2.5.7 Zkouška lámavosti .....	28
2.5.8 Zkouška dvojitým ohybem.....	28
2.5.9 Zkouška střídavým ohybem .....	29
2.5.10 Zkouška podle Gutha .....	29
2.6 Diagramy mezního přetvoření .....	30
2.6.1 Ukazatel stavu rovinné napjatosti .....	30
2.6.2 Ukazatel stavu přetvoření.....	31
2.6.3 Metody určení diagramu mezních přetvoření.....	33
2.6.3.1 Experimentální metody.....	33
2.6.3.2 Zkouška tahem s tyčemi opatřenými vruby .....	33

2.6.3.3	Zkouška hydrostatickým vyboulváním.....	33
2.6.3.4	Vypínání pevným polokulovým tažníkem tzv. Nakazima test .....	34
2.7	Metody měření deformace .....	35
2.7.1	Metoda deformačních sítí .....	35
2.7.2	Optické měřicí systémy.....	36
2.7.2.1	Měřicí systém Argus.....	36
2.7.2.2	Měřicí systém Aramis.....	37
3	Experimentální část.....	38
3.1	Statická zkouška tahem .....	40
3.1.1	Vyhodnocení statické zkoušky tahem .....	41
3.1.2	Diskuze výsledků statické tahové zkoušky.....	46
3.2	Měření normálové anizotropie .....	47
3.2.1	Vyhodnocení normálové anizotropie .....	48
3.2.2	Diskuze výsledků měření normálové anizotropie.....	48
3.3	Zkouška rozšiřování otvoru .....	49
3.3.1	Vyhodnocení zkoušky rozšiřování otvoru .....	50
3.3.2	Diskuze výsledků zkoušky rozšiřování otvoru .....	52
3.4	Měření koeficientu tření.....	52
3.4.1	Výsledky měření koeficientu tření a drsnosti .....	55
3.4.2	Diskuze výsledků měření tření a drsnosti povrchu .....	57
3.5	Měření FLD diagramu.....	58
3.5.1	Výsledky naměřených hodnot a jejich zpracování.....	60
3.5.2	Diskuze k měření FLC křivek .....	65
3.6	Metalografie.....	67
3.6.1	Vyhodnocení a diskuze metalografie.....	67
4	Závěr.....	71
	Seznam použité literatury .....	72
	Seznam příloh .....	74



## Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Význam
$\bar{x}$		Průměrná hodnota
$A_{80mm}$	[%]	Celková tažnost
$A_g$	[%]	Homogenní tažnost
$A_x$	[%]	Tažnost
$b$	[mm]	Šířka po natažení
BH		Bake Hardening
$b_0$	[mm]	Počáteční šířka
$D$	[mm]	Průměr přístřihu
$D_0$	[mm]	Průměr po tažení
$d_1$	[mm]	Průměr výtažku
$F$	[N]	Zatěžující síla
$F_{Avg}$	[N]	Průměrná hodnota tažné síly
$F_{High}$	[N]	Horní tažná síla
FLD		Diagram mezních deformací
$F_{max}$	[N]	Maximální zatěžující síla
$F_t$	[N]	Nejvyšší tažná síla
$F_{tažná}$	[N]	Tažná síla
IF		Interstitial Free
$k$	[-]	Stupeň tažení
$L$	[mm]	Délka po zkoušce
$L_e$	[mm]	Měřená délka průtahoměru
$L_0$	[mm]	Původní délka, rozměr
$m$	[-]	Koeficient tažení
$m_F$	[-]	Součinitel tažení
$m_\sigma$	[-]	Ukazatel stavu rovinné napjatosti
$m_\varphi$	[-]	Ukazatel stavu přetvoření
$p$	[MPa]	Kontaktní tlak
$r$	[-]	Koeficient normálové anizotropie
$R$	[MPa]	Smluvní napětí
$R_a$	[ $\mu m$ ]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti

$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$RP_c$		Počet výstupků drsnosti povrchu
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Maximální výška profilu
$S$	[ $\text{mm}^2$ ]	Zatěžovaný průřez
$S_{\check{c}}$	[ $\text{mm}^2$ ]	Plocha třecích čelistí
$S_o$	[ $\text{mm}^2$ ]	Počáteční plocha průřez
$S_u$	[ $\text{mm}^2$ ]	Ploch průřezu po přetržení
$T$	[%]	Přirozený stupeň hlubokotažnosti
$Z$	[%]	Kontrakce
$Z$	[%]	Kontrakce
$\Delta L$	[mm]	Prodloužení
$\Delta L_F$	[mm]	Maximální prodloužení po přetržení
$\Delta\sigma_A$	[MPa]	Index stárnutí
$\varepsilon$	[1]	Poměrné prodloužení
$\mu$		Střední hodnota
$\mu$	[-]	Koeficient tření
$\sigma$	[MPa]	Skutečné napětí
$\sigma_A$	[MPa]	Napětí při 20% plastické deformace
$\sigma_{A1}$	[MPa]	Napětí pro
$\varphi$	[1]	Skutečná (logaritmická) deformace
$\varphi_b$	[-]	Deformace ve směru šířky
$\varphi_l$	[-]	Deformace ve směru délky
$\varphi_t$	[-]	Deformace ve směru tloušťky

## 1 Úvod

Lisovatelnost materiálu je jedna z rozhodujících vlastností materiálu pro jeho zpracování a to zejména v automobilovém průmyslu. Zejména technologie plošného lisování představuje nemalou část výroby karoserie automobilů, ať už jde o vnější pohledové díly nebo vnitřní výztuhy.

Automobilový průmysl je pružně se vyvíjející odvětví průmyslu, kde se rychle mění požadavky na výrobu. V dnešní době je snaha o co možná největší eliminaci spotřeby pohonných hmot, ale zároveň zachování pokud možno dynamických vlastností automobilu. Z těchto důvodů prudce stoupají i požadavky na karoserie a tím pádem i na materiály a technologie, kterými jsou vyráběny. V dnešní době je zejména snaha o minimalizaci hmotnosti karoserie, ale zároveň dosažení co možná nejvyšší bezpečnosti vozidla. Z tohoto důvodu jsou na materiál kladeny velké nároky a to jak na jejich vlastnosti, tak tvářitelnost, aby bylo možné docílit nejrůznějších tvarů. Pro dosažení požadovaných vlastností a tvarů, lze užít různých prostředků, jako jsou plechy proměnné tloušťky, IF oceli s BH efektem.

Téma diplomové práce bylo zvoleno na základě požadavků Škoda Auto a.s. Předkládaná diplomová práce se ve své teoretické části zabývá vlivy na tvářitelnost materiálů a základními technologickými zkouškami dále pak možnostmi měření deformace a získávání FLC diagramů. V rámci experimentální části byla provedena komplexní analýza tvářitelnosti dvou hlubokotažných ocelových plechů válcovaných za studena používaných pro výrobu rámu karoserie vozu Škoda Karoq, viz obrázek 1.1. Cílem této diplomové práce je posouzení vlivu mechanických vlastností jako jedné z možných příčin vzniku vad při lisování.



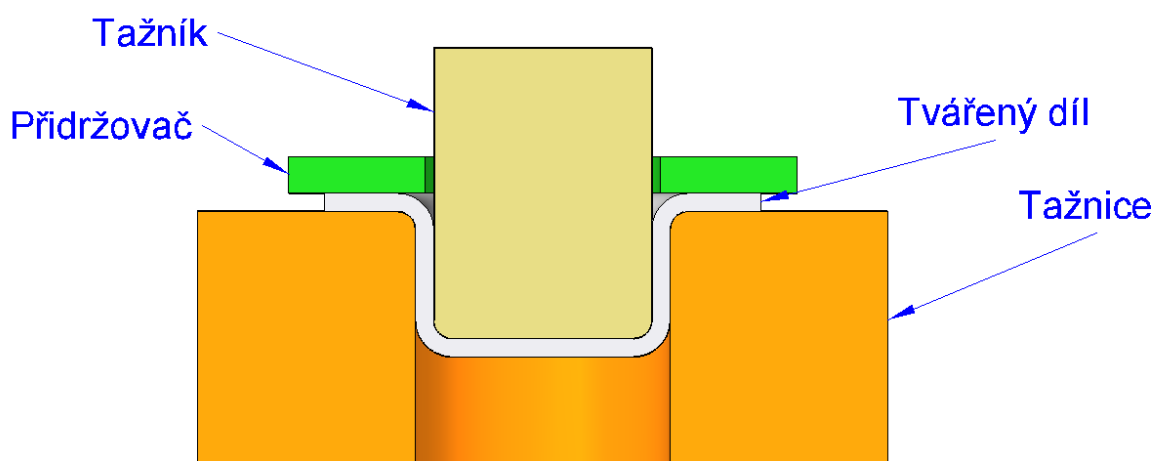
**Obr. 1.1** Rám dveří Škoda Karoq

## 2 Teoretická část

Tato část diplomové práce se zabývá základními technologickými zkouškami, vlivy na tváritelnost materiálu, způsoby získávání FLC diagramů a způsoby sledování deformace.

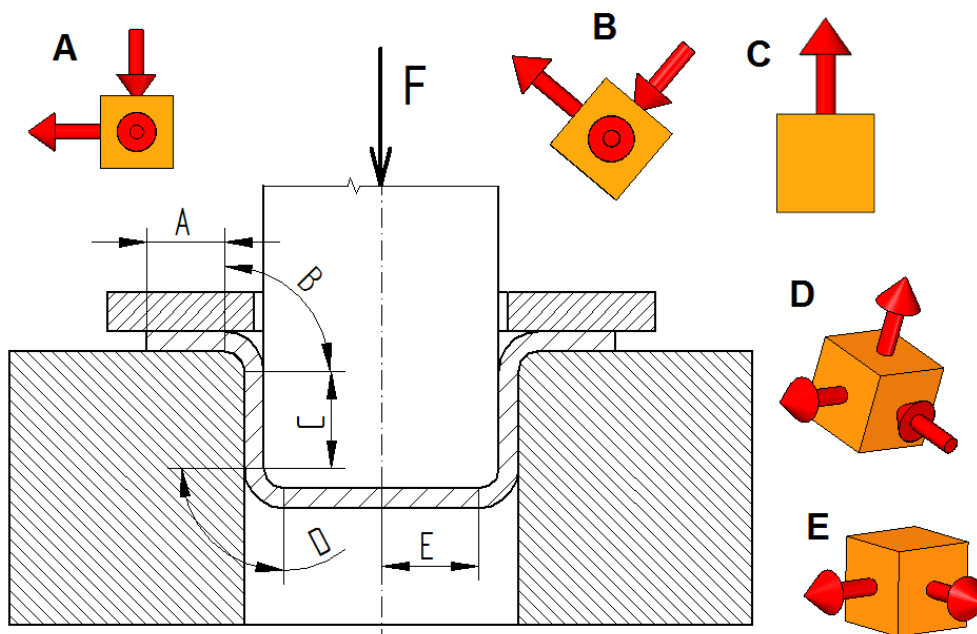
### 2.1 Základy technologie hlubokého tažení

Technologie tažení spočívá v přetvoření rovinného plechu v prostorový tvar. Při hlubokém tažení nedochází k podstatné změně tloušťky základního taženého materiálu. Z tohoto důvodu patří hluboké tažení do technologie plošného tváření. Změna tvaru probíhá důsledkem vtahování plechu do tažného nástroje při vzájemném pohybu tažníku a tažnice, nedílnou součástí tažných nástrojů je i přidržovač zabraňující tvorbě vln na výlisku, viz obrázek 2.1.



**Obr. 2.1** Schéma tažení

Technologii hlubokého tažení lze rozdělit na tažení rotačních výtažků, tažení dílů nepravidelných tvarů, tažení se ztenčením stěny, tažení bez ztenčení stěny. Při hlubokém tažení je tvářený materiál vystaven rozličným stavům napjatosti. Příklad stavů napjatosti pro tažení válcové symetrické nádoby s přidržovačem je na obrázku 2. 2. [1, 2,3]



**Obr. 2.2** Schéma napjatosti při tažení

Jak je patrné z obrázku, napjatost se mění dle místa na výtažku. V oblasti A pod přidržovačem vzniká důsledkem tlaku přidržovače prostorová napjatost a deformace. V oblasti B na tažné hraně vzniká vlivem prostorového ohybu složitá deformace a poměrně složitá napjatost, zde je největší radiální tahové napětí. Na válcové části C výtažku je jednoosá tahová napjatost a rovinná deformace. Část výtažku D, vyskytující se na hraně tažníku na přechodu válcové stěny ve dno, je vystavena prostorové nerovnoměrné napjatosti, která vede ve výrazné prodloužení a ztenčení stěny v tomto místě. V tomto místě dochází nejčastěji ke vzniku trhlin.

V části dna E je opět rovinná tahová napjatost a prostorová deformace. Při tažení na jeden tah je zeslabení stěny dna velice malé, hodnota zeslabení se pohybuje kolem 2 %. Při hlubokém tažení nepravidelných výtažku takzvaného karosářského typu jsou napjatosti a jim odpovídající přetvoření komplikované. [2]

### Koeficient a stupeň tažení

Koeficient tažení  $m$  je poměrný ukazatel, který nám udává poměrné zmenšení průměru výtažku  $k$  předešlému rozměru, viz vzorec 1. Koeficient tažení nabývá nejčastěji hodnot z intervalu (0,5; 0,9). [1]

#### Koeficient tažení:

$$m = \frac{d_1}{D_0} \quad [-] \quad (1)$$

Kde:

$m$	-	koeficient tažení	$[-]$
$d_1$	-	Průměr výtažku	$[mm]$
$D_0$	-	průměr po tažení	$[mm]$

Někdy se udává stupeň tažení  $k$ , viz vzorec 2, což je převrácená hodnota koeficientu tažení. [1]

#### Stupeň tažení:

$$k = \frac{1}{m} \quad [-] \quad (2)$$

Kde:

$k$	-	stupeň tažení	$[-]$
$m$	-	koeficient tažení	$[-]$

## 2.2 Materiály používané pro hluboké tažení

Hlubokotažné oceli se vyznačují nízkými mechanickými vlastnostmi a vysokou schopností plastického přetvoření. Tyto materiály mají zejména vysokou hodnotu tažnosti. Jsou využívány pro tvarově složité díly karoserie. Vliv na tváritelnost hlubokotažných materiálů má zejména chemické složení, struktura a textura materiálu. Základem struktury u hlubokotažných materiálů je cementit a ferit. Vliv má především velikost a tvar feritického zrna, tvar a rozložení cementitu a jiných vměstků. Pro dobrou tváritelnost je nejvýhodnější aby byl cementit rozložen pravidelně a měl tvar globulí. Velikost feritických zrn má vliv na povrch výtažků. [4, 5]

### 2.2.1 IF oceli

Jedná se o oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku, který se pohybuje okolo 0,015 %C. Ocel je legována Ti a Nb nebo jejich kombinací. Legováním se dosáhne vyvázáním intersticiálních prvků uhlíku a dusíku na stabilní precipitáty. Mechanické vlastnosti IF ocelí se regulují velikostí zrna, které je docilováno legováním například Ti a Nb. Ocel je odolná vůči stárnutí materiálu. Materiál je charakteristický nízkou mezí kluzu a pevnosti. Mez pevnosti se pohybuje zhruba okolo 270 MPa. Ocel má výborné vlastnosti pro hluboké tažení, tažnost dosahuje hodnot okolo 45%. Je používána na vnější tvarově náročné pohledové díly karoserie. [4]

### 2.2.2 IF ocel s BH efektem

Tento materiál je velmi podobný klasické IF oceli. Používá se pro vnější pohledové díly, které jsou při tažení vystaveny malé plastické deformaci. K BH efektu dochází při lakování vlivem zvýšené teploty. K BH efektu dochází zablokováním dislokací intersticiálními atomy uhlíku a dusíku. BH efekt spočívá v nárůstu mechanických hodnot během procesu lakování, kdy je výlisek vystaven zhruba 20 minut teplotě okolo 190°. K nejvýraznějšímu nárůstu pevnosti vlivem BH efektu dochází zhruba mezi 2% až 5% deformace. Nárůst mechanických hodnot je závislý na chemickém složení, velikosti zrna předcházející deformaci během lisování. Nárůst pevnosti vlivem BH efektu bývá u IF ocelí okolo 50 MPa. [4]

## 2.3 Tvářitelnost

Tvářitelnost materiálu znamená, že materiál je schopen tvořit jakostní výrobek pomocí plastické deformace za tepla nebo za studena bez toho, aby došlo k jeho porušení. Tvářitelnost je ovlivněna jednak vnitřní stavbou materiálu, tak způsobem tváření, dále napjatostí, teplotou, rychlostí deformace. Mezi hlavní ukazatele tvářitelnosti pro plošné tváření patří zejména, koeficient normálové a plošné anizotropie, náchylnost ke stárnutí. Dále sem patří hodnoty mezí kluzu a pevnosti a ukazatele plasticity jako je tažnost, kontrakce. Tyto ukazatele jsou zjišťovány nejčastěji pomocí statické

zkoušky tahem, a proto jim bude dále věnována kapitola „Statická zkouška tahem“.

Pro posouzení tvářitelnosti se používají také technologické zkoušky, které se svou povahou více blíží skutečným tvářecím operacím. Zkoušky technologických vlastností určují vhodnost daného materiálu pro zpracování určitou technologií, nebo porovnávají materiály mezi sebou, který je vhodnější pro danou technologii. Výsledek zkoušky není ovlivněn obvykle pouze jedním parametrem, ale souborem vlastností materiálu a podmínkami zkoušky. [1]

### **2.3.1 Anizotropie**

Anizotropie je závislost mechanických a fyzikálních vlastností plechu vzhledem k jeho směru válcování. Vzniká důsledkem přednostní deformace v jednom směru důsledkem válcování. Při válcování dochází k natáčení jednotlivých zrn dle směru válcování. Vzniká takzvaná deformační textura, která se vyznačuje směrovým uspořádáním zrn a lze ji eliminovat pomocí rekrytalizace. Zároveň při válcování dochází ke směrovému uspořádání případných nečistot, které je příčinou vzniku vláknité textury. Této textury se nelze zbavit rekrytalizací. Vlivem vysoké čistoty se u IF ocelí tento druh textury prakticky nevyskytuje. Rozlišujeme normálovou anizotropii a plošnou anizotropii.

#### **2.3.1.1 Normálová anizotropie**

Normálová anizotropie udává nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu vzhledem k mechanickým vlastnostem ve směru tloušťky plechu. Normálová anizotropie se měří dle normy ISO 10113. Normálová anizotropie udává, jak moc se při deformaci daný plech bude ztenčovat. Čím je hodnota normálové anizotropie větší, tím je plech vhodnější pro tváření. Hodnotí se pro směry  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Anizotropie se vypočte jako podíl logaritmické deformace ve směru šířky a tloušťky, viz vzorec 3. [5, 6]



### Koeficient normálové anizotropie:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} \quad [-] \quad (3)$$

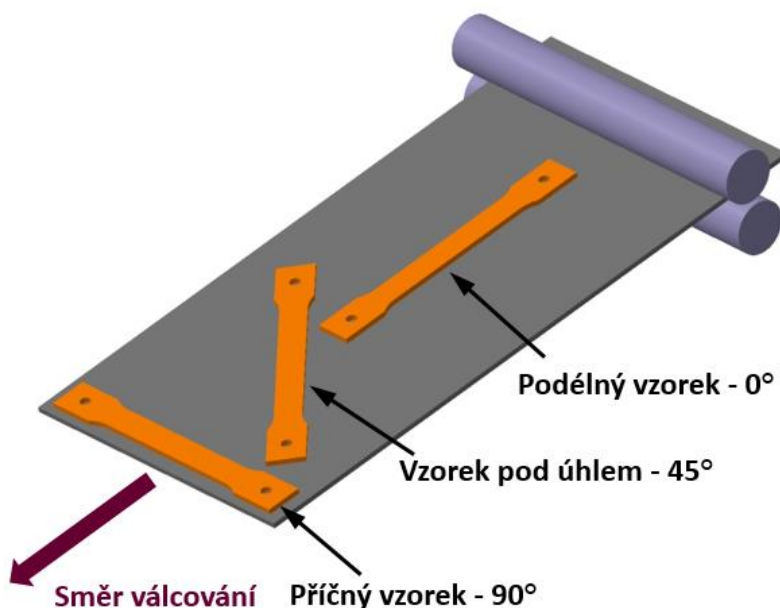
Kde:

$r$	-	koeficient normálové anizotropie	$[-]$
$\varphi_b$	-	deformace ve směru šířky	$[-]$
$\varphi_t$	-	deformace ve směru tloušťky	$[-]$

Vzhledem k obtížnému měření změny tloušťky materiálu lze normálovou anizotropii počítat ze změny délky a šířky zkušební vzorku.

#### 2.3.1.2 Plošná Anizotropie

Plošná anizotropie udává nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu s ohledem na směr válcování. Je zjišťována pomocí statické tahové zkoušky na plochých tyčích. Vzorky se odebírají z plechu pod úhly  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  oproti směru válcování, viz obrázek 2.3.



Obr. 2.3 Odebírání vzorků

Plošná anizotropie se nejvíce projevuje u meze kluzu a meze pevnosti dále u tažnosti. Následkem plošné anizotropie při tažení dochází ke vzniku cípů, také má za následek rozměrové odchylky výtažků. Při tažení složitých dílů je vhodné orientovat směr s nejlepšími vlastnostmi do exponovaných míst výtažku. Hodnota plošné anizotropie se vypočte dle vzorce 4. [1, 5]

### Výpočet plošné anizotropie pro mez kluzu [5]

$$A_{Re} = \frac{R_e(\alpha) - R_e(0^\circ)}{R_e(0^\circ)} \quad [-] \quad (4)$$

Kde:

$A_{Re}$  - koeficient plošné anizotropie pro mez kluzu

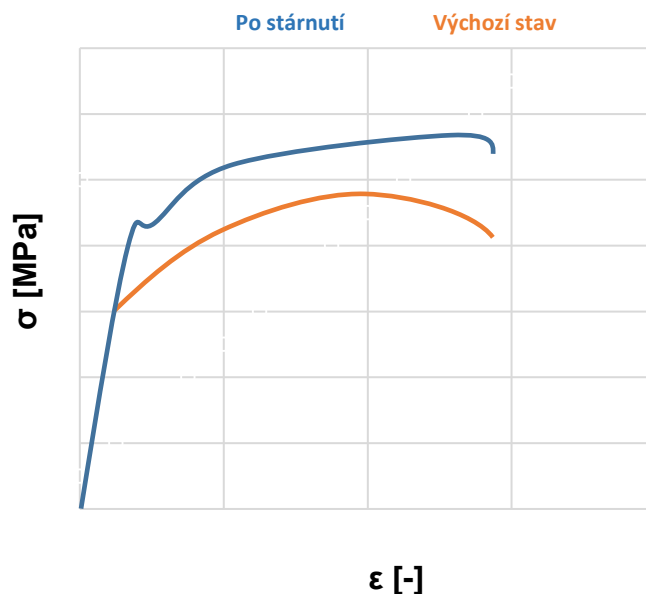
$R_e(\alpha)$  - mez kluzu pro směr  $\alpha$

$R_e(0^\circ)$  - mez kluzu pro směr  $0^\circ$

### 2.3.2 Stárnutí materiálu a jeho vliv na tváritelnost

Stárnutí materiálu proces relativně pomalých změn mechanických a chemických vlastností daného materiálu. Vlivem stárnutí se mění struktura z metastabilního stavu na stav co nejbližší rovnovážnému. Příčinou stárnutí bývá hromadění volných atomů dusíku a uhlíku u dislokací. Tímto shlukováním atomů dochází k zablokování pohybu dislokací. Pohyb dislokací v materiálu je nezbytný pro tvárění materiálu. Stárnutí materiálu se projevuje zvýšením meze kluzu, ale mez pevnosti zůstává stejná. Z tohoto důvodu dojde k poklesu zásoby plastičnosti. U materiálu, u kterého došlo k deformačnímu stárnutí, se vyskytuje v oblasti meze kluzu kolísání napětí, což se nazývá takzvaná Lüdersova deformace.

Náchylnost materiálu k deformačnímu stárnutí se hodnotí například pomocí indexu stárnutí, viz vzorec 5. Při zkoušce se vzorek natáhne do té doby, dokud se nedocílí 20% plastické deformace. Po té se dá do pece na  $100^\circ$  po dobu 30 minut a následně se opět natahuje, dokud se nedocílí další plastické deformace. Index stárnutí je pak rozdílem potřebného napětí pro dosažení plastické deformace po stárnutí a napětí potřebného pro dosažení 20% deformace. [1, 2, 5]



**Obr. 2.3** Vliv stárnutí

#### Index stárnutí:

$$\Delta\sigma_A = \sigma_{A1} - \sigma_A \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Kde:

- $\Delta\sigma_A$  - index stárnutí
- $\sigma_{A1}$  - napětí potřebné pro další plastickou deformaci [MPa]
- $\sigma_A$  - napětí v tahu při 20% plastické deformace [MPa]

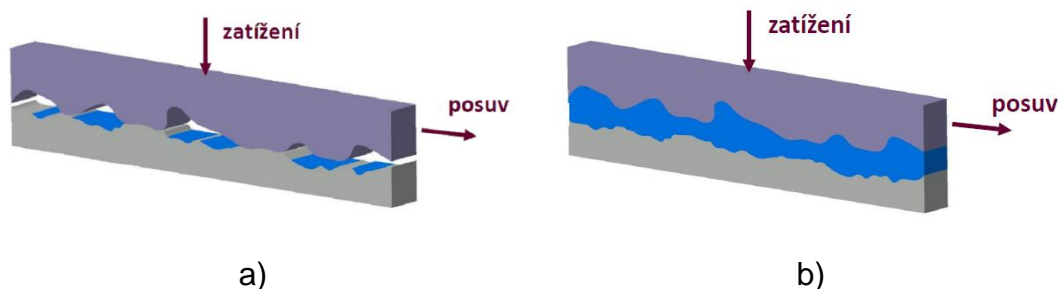
### 2.3.3 Vliv tření

Věda zabývající pohybem a pokusem o pohyb dvou těles, se nazývá tribologie. Tření v procesu hlubokého tažení může mít jak kladný tak negativní vliv. Pokud nám třecí síla brání v tváření, snažíme se o její eliminaci. Ke snížení tření se v praxi používají různé druhy mazadel, naopak pokud potřebujeme zvětšit třecí síly, tak lze použít brzdící lišty. Velikost koeficientu tření v procesu tažení je závislá na mnoha parametrech, jako je drsnost třecích ploch, kontaktní tlak, druh použitého maziva. Při tváření rozlišujeme několik druhů tření.

Suché tření vzniká, pokud se dva povrchy dotýkají a není přítomno žádné mazivo. Při tomto druhu tření je koeficient tření řádově okolo 0,6.

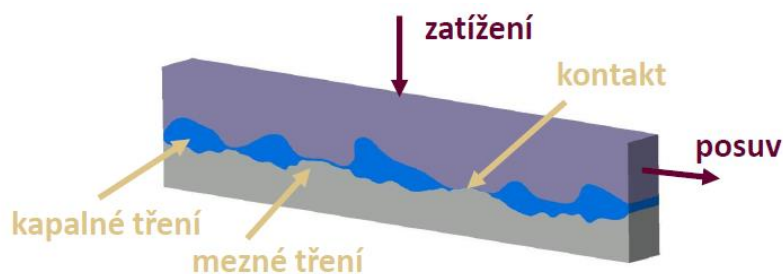
Mezné tření vzniká, pokud je mezi třecí dvojicí přítomno mazivo, ale přívod maziva není dostatečný. Schéma mezného tření viz obrázek 2.4 a. Hodnota koeficientu tření se pohybuje u mezného tření okolo 0,1.

Kapalné tření vzniká, pokud dojde k dokonalému oddělení povrchů od sebe. Mezi povrchy je souvislá vrstva kapaliny. Vnitřní tlak kapaliny musí vyrovnat vnější tlak na povrchy třecí dvojce. Vznik kapalného tření je podporován vysokou viskozitou mazadla, malým kontaktním tlakem a velkou rychlostí posuvu a nízkou drsností povrchu, schéma viz obrázek 2.4 b. [2]



**Obr. 2.4** a) Mezné tření b) Kapalné tření

Smíšené tření představuje nejrozšířenější druh tření při tváření kovů. Vyznačuje se tím že, mezi třecími dvojicemi se vyskytují všechny předchozí druhy tření. Vzniká, pokud třecí plochy nejsou dokonale odděleny vrstvou maziva. Schéma smíšeného tření viz obrázek 2.5.



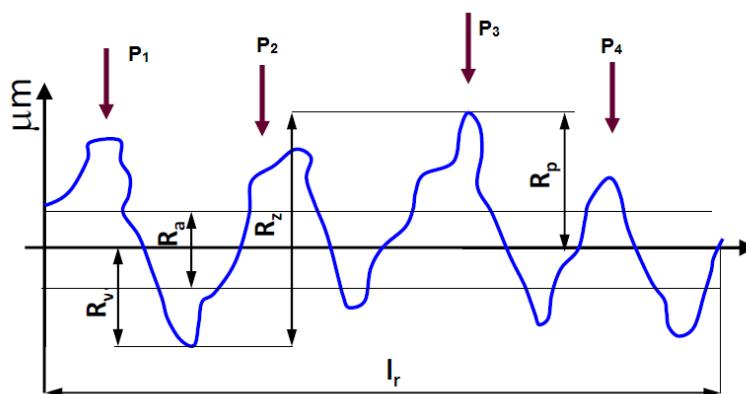
**Obr. 2.5** Smíšené tření

Při studiu povrchů dvou těles bylo prokázáno, že jejich vzájemný kontakt není po celé ploše, ale je pouze lokální. Dochází k lokálním plastickým

deformacím vrcholů povrchu. Dochází k jejich kovovému spojení a následnému usmýknutí. Měkčí z obou povrchů je tím tvrdším rozrýván. [2]

### 2.3.3.1 Hodnocení povrchu

Vlastnosti povrchu mají velký vliv na proces tváření, proto je důležitá kontrola povrchu jak nástrojů, tak i tvářeného materiálu. Mezi základní ukazatele drsnosti povrchu patří maximální výška profilu  $R_z$ , pak střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  a počet výstupků  $RP_c$ . Pro tvářený materiál jsou důležité zejména hodnoty  $R_a$  a  $RP_c$ . Pro povrch nástroje je důležitá hodnota  $R_z$ . Schéma reálného povrchu se zakótovanými základními parametry je na obrázku 2.6.

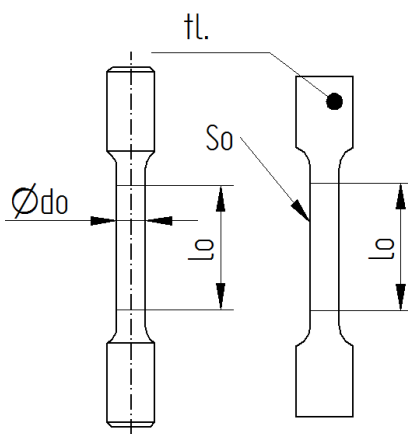


Obr. 2.6 Parametry drsnosti

## 2.4 Statická zkouška tahem

„Tato zkouška patří mezi základní mechanické zkoušky. Pomocí tahové zkoušky zjišťujeme základní mechanické vlastnosti materiálu. Z tohoto důvodu se provádí téměř u všech technických materiálů. Zkouška se převážně neprovádí na hotových výrobcích, ale na zkušební vzorku. Zkušební vzorek bývá jednoduchého tvaru, který je normalizován. Vzorky bývají kruhové nebo ploché zkušební tyče, viz obrázek 2.7. Nejčastěji používané délky plochých tyčí jsou 50, 80, 100 a 120 mm. V průběhu zkoušky je tyč zatěžována plynule rostoucí silou, která narůstá do té doby, než dojde k úplnému porušení vzorku. V průběhu zkoušky jsou zaznamenávány hodnoty síly a prodloužení zkušební tyče. Pomocí trhací zkoušky jsou zjišťovány zejména hodnoty meze pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa],

poměrného prodloužení  $\varepsilon$  [1], absolutního prodloužení  $\Delta L$  [mm], tažnosti  $A_x$  [%] a kontrakce  $Z$  [%]. Lze také odečíst meze úměrnosti a kluzu. V průběhu tahové zkoušky v průřezu zkušební tyče vzniká napětí, které je definováno jako podíl zatěžující síly a plochy průřezu. Průřez trhací tyče se v průběhu zkoušky mění. Podíl zatěžující síly a skutečné plochy průřezu se nazývá skutečným napětím. Obvykle se pracuje s hodnotami smluvního napětí, které je dáno jako podíl zatěžující síly  $F$  [N] a původní plochy průřezu  $S_0$  [mm<sup>2</sup>].



**Obr. 2.7** Zkušební tyče pro zkoušku tahem

Trhací stroje v průběhu zkoušky zaznamenávají závislost absolutního prodloužení  $\Delta L$  [mm] na zatěžující síle  $F$  [N]. Závislost absolutního prodloužení na zatěžující síle se nazývá pracovní diagram. Závislost poměrného prodloužení na smluvním napětí se nazývá smluvní diagram.

### **Poměrné prodloužení $\varepsilon$ [1], tažnost $A$ [%] a kontrakce $Z$ [%]**

Poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [1] je dáno podílem přírůstku délky a původní délky viz vzorec 6. Podobně je definována tažnost. Tažnost je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech ve specifických bodech, jedná se o mez pevnosti a okamžik porušení vzorku. Tažnost se vypočte dle vzorce 7. Obecně tažnost udává, jak je daný materiál tvárný. Tažnost je jedním z ukazatelů tvárnosti. Na výslednou hodnotu tažnosti má vliv délka zkušební tyče. U kratších vzorků se jeví tažnost jako větší a proto u hodnot tažnosti bývá index  $x$ , který udává, použitou počáteční měřenou délkou.

Kontrakce  $Z$  [%] neboli zúžení profilu je dána rozdílem ploch průřezu před a po zkoušce děleného původní plochou průřezu, viz vzorec 8. U křehkých materiálů dojde k porušení téměř bez kontrakce. Kontrakce je

ukazatelem tvárnosti a houževnatosti materiálu při prostorové napjatosti. Houževnatost lze popsat jako práci spotřebovanou k plastickému přetvoření. K hrubému posouzení houževnatosti a chování materiálu při plastické deformaci lze použít plochu pod křivkou v pracovním diagramu.“ [7]

### Poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (6)$$

Kde:

$\Delta L$	-	prodloužení	[mm]
$L_0$	-	původní délka	[mm]
$L$	-	délka po zkoušce	[mm]

### Tažnost

$$A = \frac{\Delta l_F}{L_e} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

Kde:

$\Delta l_F$	-	prodloužení v okamžiku lomu	[mm]
$L_e$	-	měřená délka průtahoměru	

### Kontrakce

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

Kde:

$S_0$	-	počáteční plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
$S_u$	-	plocha průřezu po přetržení	[mm <sup>2</sup> ]

### Mez pevnosti v tahu $R_m$ , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

„Pevnost v tahu  $R_m$ , neboli mez pevnosti v tahu je dána hodnotou smluvního napětí, které je dáno podílem maximální zatěžující síly způsobující porušení a původní plochy průřezu.

Mezí kluzu se rozumí smluvní napětí, při kterém se zkušební tyč začne výrazně prodlužovat bez nárůstu zatěžující síly. Tato hodnota u některých materiálů bývá v grafu velmi špatně čitelná. U takových materiálů je stanovena takzvaná smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ . Smluvní mez kluzu je napětí, které vyvolá trvalé prodloužení zkušební tyče, nejčastěji to je 0,2%.“ [7]

**Mez pevnosti**

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

Kde:

- $F_{\max}$  - maximální zatěžující síla [N]  
 $S_0$  - původní průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>]

**Skutečná deformace a skutečné napětí**

U velkých deformací dochází k značné odlišnosti okamžitého stavu zatěžovaného tělesa a výchozího stavu, proto vyjádření poměrnou deformací a smluvním napětím není dostatečně výstižné a přesné. Proto se používá skutečná deformace a skutečné napětí. [7]

**Skutečná deformace**

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad [1]$$

Kde:

- $\varphi$  - skutečná (logaritmická) deformace [1] (10)  
 $\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1]

**Skutečné napětí**

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

Kde:

- $\sigma$  - skutečné napětí [MPa]  
 $R$  - smluvní napětí [MPa]  
 $\varepsilon$  - poměrné prodloužení [-]



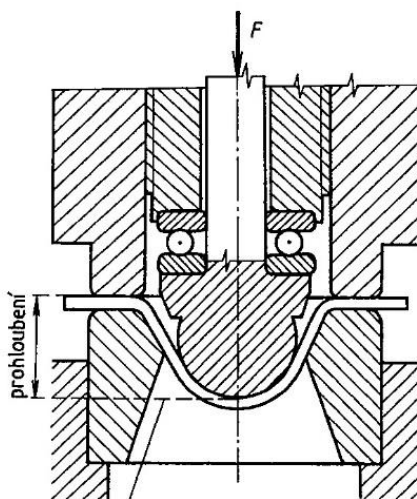
## 2.5 Technologické zkoušky tvářitelnosti

Technologické zkoušky udávají chování materiálu v podmínkách blízkých tvářecímu procesu. Mezi nejznámější technologické zkoušky tvářitelnosti patří například Zkouška hloubení dle Erichsena, zkouška rozšiřování otvoru, zkouška tažení v kuželové tažnici, hydraulická zkouška a podobně.

Další skupinou technologických zkoušek pro plošné tváření jsou zkoušky ohýbatelnosti plechů, mezi tyto zkoušky patří například zkouška lámavosti, dvojitém ohybem a podobně. [1, 2, 5]

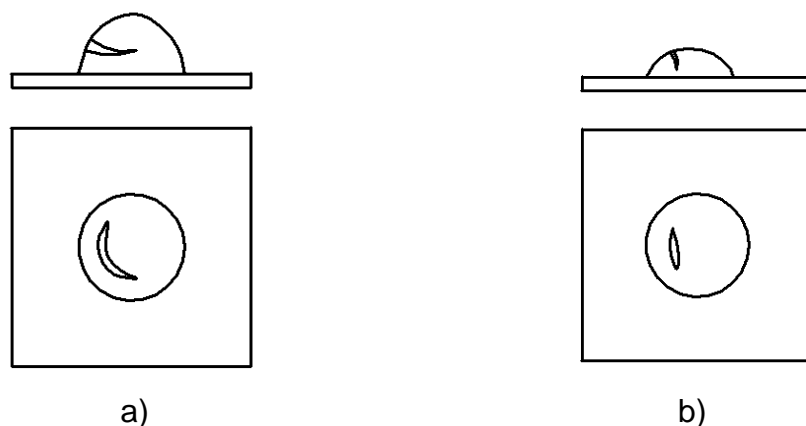
### 2.5.1 Zkouška hloubení dle Erichsena

Zkouška hloubení dle Erichsena je používána k posouzení hlubokotažnosti ocelových plechů. Princip zkoušky je vidět na obrázku 2.8. Vzorek je upnut mezi přidržovačem a tažnicí. Tažníkem je koule o průměru 20 mm. Tažník je rovnoměrně posouván do středu měřeného vzorku. Posuv tažníku je realizován hydraulicky nebo ručně. Zkouška je ukončena v okamžiku vzniku první praskliny po celé tloušťce vzorku. Kritériem hlubokotažnosti je prohloubení. Zkouška je nenáročná na přípravu vzorku a její provedení. [1, 2, 5]



**Obr. 2.8** Zkouška hloubením podle Erichsena

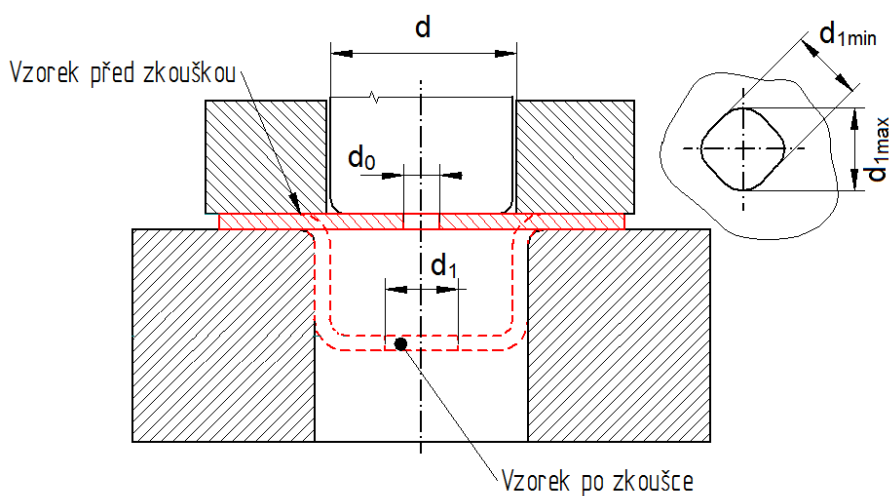
Dle tvaru trhliny lze také posoudit vhodnost materiálu pro hluboké tažení. Tvary trhlin u vhodného a nevhodného materiálu jsou patrné na obrázku 2.9.



**Obr. 2.9** Tvar trhliny a) vhodný materiál b) nevhodný

### 2.5.2 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Je používána k vyhodnocení hlubokotažnosti materiálu, lze hodnotit i anizotropii materiálu. Princip zkoušky je patrný z obrázku 2. 10. Zkoušený vzorek je čtvercový nebo kruhový přístřih s kruhovým otvorem na středu. Vzorek je přidržován pomocí přidržovače, tažník je válcový se zaoblenou hranou. Při tažení dochází k rozšiřování původního otvoru ve zkušebním vzorku.



**Obr. 2.10** Zkouška podle Siebela a Pompa

Zkouška je ukončena v okamžiku, kdy dojde k vytvoření radiálních trhlinek po obvodu vzorku. Po ukončení zkoušky se vyhodnocuje hloubka prohloubení tažníku nebo průměr rozšířeného otvoru. Otvor v důsledku anizotropie není kruhový, lze tedy hodnotit i anizotropii materiálu. [1, 5]

### 2.5.3 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)

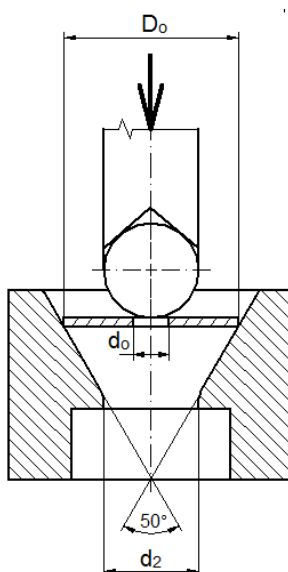
Princip zkoušky je na obrázku 2.11. Vzorkem je plný nebo provrtaný na středu kruhový přístřih. Přístřih je tažen v kuželové tažnici do okamžiku vzniku trhliny u otvoru nebo na dně výtažku. Tažení je bez použití přidržovače, tím odpadá vliv přidržovací síly. Kritériem hlubokotažnosti je součinitel tažení  $m_F$ . [2, 5]

**Součinitel tažení:**

$$m_F = \frac{d_1}{D} \quad [-] \quad (12)$$

Kde:

$m_F$	-	součinitel tažení	[-]
$d_1$	-	největší průměr kuželového výtažku v okamžiku vzniku trhliny	[mm]
$D$	-	průměr přístřihu	[mm]



**Obr. 2.11** Zkouška tažením v kuželové tažnici

## 2.5.4 Zkouška hlubokým tahem a přetržením

Zkouška je prováděna na speciálním stroji, kde lze sledovat závislost tažné síly na deformaci vzorku. V první fázi zjistíme maximální tažnou sílu. Tažení probíhá s přidržovačem. Po dosažení maximální tažné síly a jejím poklesu dojde k sevření zbylého přístřihu pod přidržovačem, tažník se pohybuje dál až do úplného odtržení dna kalíšku. Výsledkem pro posouzení hlubokotažnosti je hodnota  $T$ , kterou lze vypočítat dle vzorce 13. Hlubokotažné plechy by měly mít hodnotu  $T$  více jak 40 %. [1, 2, 5]

**Kritérium hlubokotažnosti:**

$$T = \frac{F_{\max} - F_t}{F_{\max}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

Kde:

$F_{\max}$  - síla potřebná pro utržení dna [N]

$F_t$  - nejvyšší tažná síla [N]

## 2.5.5 Kalíškovací zkouška AEG

Kalíškovací zkouška slouží pro posouzení hlubokotažnosti. Zkouška napodobuje tažení nádoby rotačního tvaru. Cílem této zkoušky je vyhodnocení maximální hodnoty stupně tažení  $K$ , při kterém již dochází k porušení. Výpočet stupně tažení viz vzorec 2. Zkouška je zdlouhavá, protože zkoušku je nutné opakovat několikrát pro různé průměry kruhových přístřihů, dokud nenajdeme největší průměr přístřihu, ze kterého lze ještě vytáhnout kalíšek, nebo musíme během zkoušky měnit průměry tažných nástrojů. [1, 2, 5]

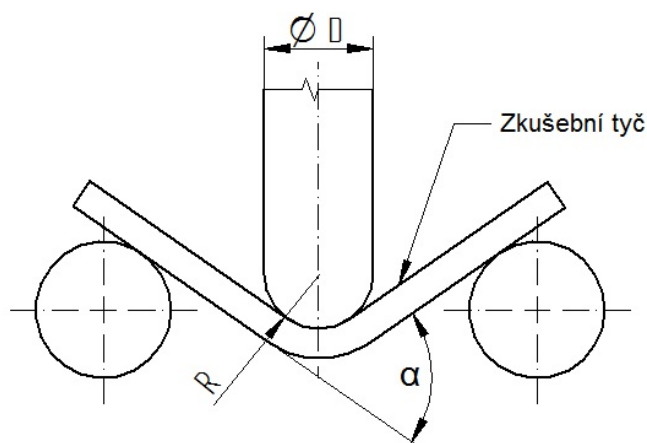
## 2.5.6 Hydraulická zkouška

Zkoušený vzorek plechu je uchycen přidržovačem. Přidržovač zároveň brání úniku tlakové kapaliny. Vzorek je plný kruhový přístřih. Při zkoušce je vystaven dvojosé napjatosti. Při zkoušce se pod vzorek přivádí tlaková kapalina, tlak se postupně zvyšuje, až dojde k porušení vzorku. Kritériem hlubokotažnosti je prohloubení plechu. Posuzuje se tvar trhliny. Hydraulická

zkouška je přesnější oproti zkoušce dle Erichsena. U hydraulické zkoušky odpadá vliv tření. U této zkoušky do jisté míry odpadají technologické vlivy. Její nevýhodou je potřeba složitějšího zařízení a nebezpečí výstřiku kapaliny při destrukci. [5]

### 2.5.7 Zkouška lámavosti

Princip zkoušky je patrný z obrázku 2.12. Zkoušku lze provádět na lisu nebo jakémkoliv stroji schopném vyvodit dostatečnou tlakovou sílu. Vzorky jsou ploché tyče ze silného plechu, používá se pro plechy o síle 25 až 50 mm. Vzorky se odebírají v souladu s normou. Nejnepříznivější je, pokud osa ohybu je shodná s vlákny plechu. Kritériem zkoušky je úhel ohybu  $\alpha$  při kterém nevznikne žádná trhlina. [5]



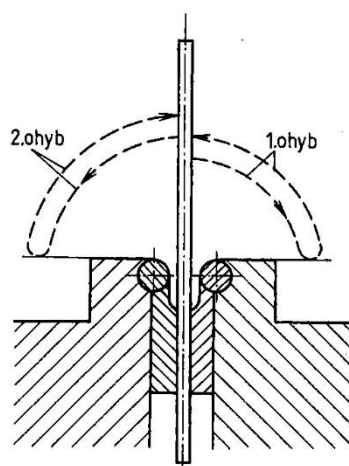
**Obr 2.12** Zkouška lámavosti

### 2.5.8 Zkouška dvojitým ohybem

Zkušebním vzorkem je čtvercový plech o stranách 200 mm. Vzorek je v prvním ohybu přehnut na polovinu. Při druhém ohybu je rovina ohybu kolmá na první ohyb, vzorek je opět přehnut na polovinu. U materiálu vhodných pro tváření při této zkoušce nedojde ke vzniku trhlin. [5]

### 2.5.9 Zkouška střídavým ohybem

Cílem zkoušky je určení odolnosti materiálu vůči střídavému ohybu o  $90^\circ$  kolem válcové plochy předepsaného poloměru. Schéma zkoušky je na obrázku 2.13. Zkušební vzorky jsou pásy plechu o šířce 20 mm a délce 100 mm, tloušťka vzorků bývá do 3 mm. Vyhodnocuje se počet ohybů do úplného zlomení vzorku. Ohyb, při kterém došlo k porušení, se již nezapočítává. [5]



Obr. 2.13 Zkouška střídavým ohybem [5]

### 2.5.10 Zkouška podle Gütha

Slouží k určení minimálního poloměru ohybu plechu. Vzorek je ohýbán v nástroji s proměnlivým poloměrem ohybu nástroje. Ohybník je řešen s poloměrem 0 až poloměr  $R_x$ . Po zkoušce se vyhodnocuje nejmenší poloměr, při kterém nevznikla ještě trhlina ve zkoušeném vzorku. [5]

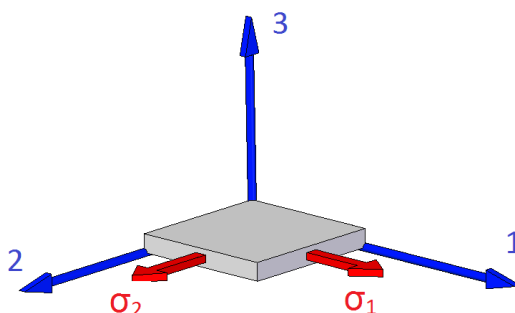
## 2.6 Diagramy mezního přetvoření

Diagramy mezních přetvoření slouží pro zobrazení mezního stavu tvářeného materiálu v závislosti na stavu přetvoření.

Mezní stav lze definovat více způsoby. Například za něj lze považovat dosažení meze pevnosti, nebo tvárný lom. Tento stav je ovlivněn nejen plastičností a mechanickými vlastnostmi materiálu, ale i stavem napjatosti. Pro posouzení stavu napjatosti zavádíme takzvaný ukazatel stavu rovinné napjatosti. [9]

### 2.6.1 Ukazatel stavu rovinné napjatosti

Ukazatel stavu napjatosti  $m_\sigma$  je poměr mezi hlavními napětí v rovině plechu. Získáme ho zavedením hlavních napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  v rovině plechu, viz obrázek 2.14. A zároveň předpokládáme, že napětí ve směru tloušťky plechu  $\sigma_3 = 0$  a zároveň  $|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$ . Pro tato napětí platí vztah:  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$ . Z uvedeného vztahu vyplývá ukazatel rovinné napjatosti  $m_\sigma$ . Ukazatel rovinné napjatosti náleží do intervalu hodnot  $m_\sigma \in \langle -1; 1 \rangle$ . [9, 10]



Obr. 2.14 Schéma napjatosti

**Ukazatel stavu rovinné napjatosti:**

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad [-] \quad (14)$$

Kde:

- |            |   |                                 |       |
|------------|---|---------------------------------|-------|
| $\sigma_1$ | - | hlavní napětí v rovině plechu   | [MPa] |
| $\sigma_2$ | - | vedlejší napětí v rovině plechu | [MPa] |

## 2.6.2 Ukazatel stavu přetvoření

Na výlisku nelze změřit přímo velikost napětí, lze však pomocí různých metod změřit velikosti jednotlivých deformací jako následek působící napjatosti. Z tohoto důvodu se užívá ukazatele stavu přetvoření  $m_\varphi$ , který je definován jako podíl logaritmických deformací. Ukazatel stavu přetvoření náleží stejně jako ukazatel stavu napjatosti do intervalu  $m_\varphi \in \langle -1; 1 \rangle$ . [9, 10]

**Ukazatel stavu přetvoření:**

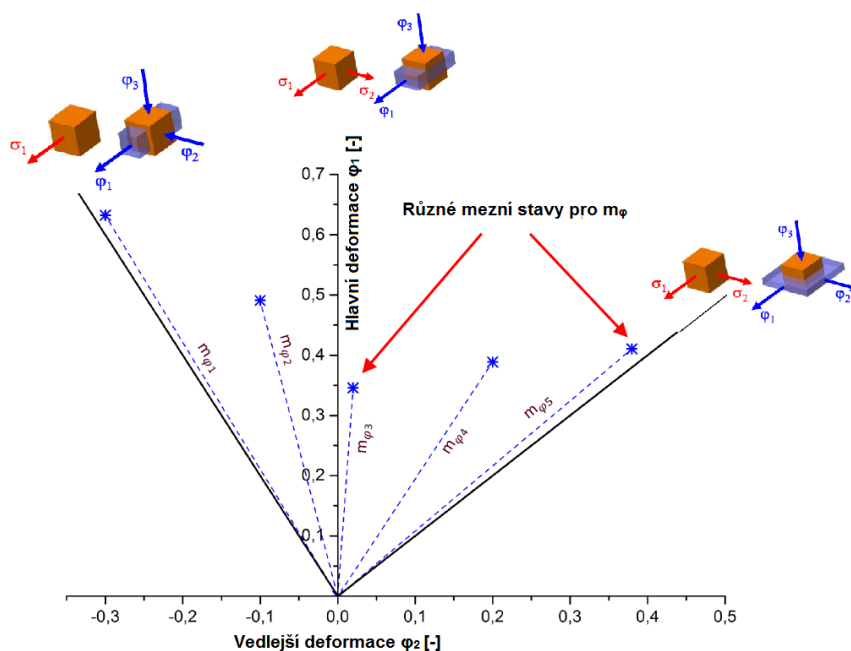
$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad [-] \quad (15)$$

Kde:

$\varphi_1$  -hlavní deformace v rovině plechu [-]

$\varphi_2$  - vedlejší deformace v rovině plechu [-]

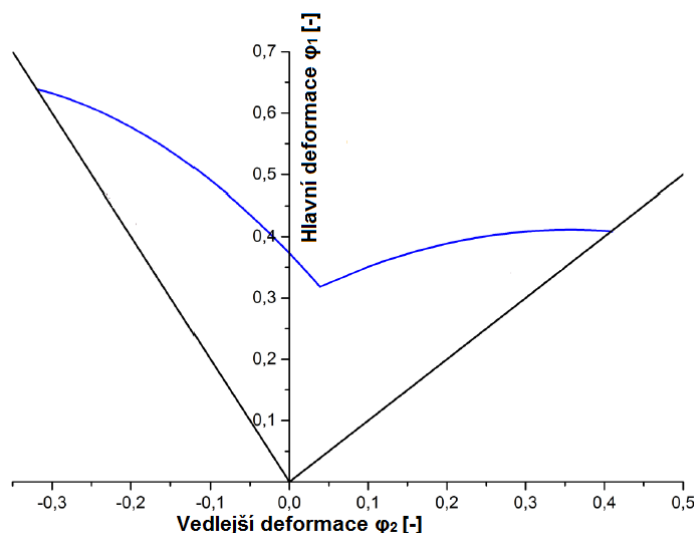
Základem diagramů mezních přetvoření, jak je znázorněno na obrázku 2.15, je určení mezní deformace materiálu, pro různé ukazatele stavu napjatosti  $m_\sigma$  respektive ukazatele stavu přetvoření  $m_\varphi$ . Na levé straně diagramu mezních přetvoření je stav, který odpovídá prostému tahu. Na pravé straně je stav odpovídající dvojosému tahu.



**Obr. 2.15** Tvorba FLC diagramu



Na osách grafu mezního přetvoření jsou vyneseny logaritmické deformace v rovině plechu, na svislé ose je hlavní deformace a na vodorovné je vynesena vedlejší deformace. Diagram mezního přetvoření získáme následným proložení bodů křivkou, viz obrázek 2.16.



**Obr. 2.16** FLC křivka

Graf je rozdělen minimem, které ho dělí na pravou a levou část. Oblast nad křivkou je oblast nepřípustných deformací, oblast pod křivkou je oblast bezpečného lisování. Veliký vliv na tvar křivek má materiál, tloušťka plechu, orientace vzorku vůči směru válcování, předešlé deformace.

Velikost mezních přetvoření není závislá pouze na vlastnostech zkoumaného plechu, ale také na definici mezního stavu. Za mezní stav lze považovat dosažení meze pevnosti, nebo až porušení materiálu vlivem tvárného lomu.

Potřebné hodnoty pro stanovení diagramu mezních přetvoření lze získat pomocí měření, nebo poččetně. Diagramy mezních přetvoření slouží pro posouzení lisovatelnosti daného dílu. Pokud máme u daného dílu například pomocí numerické simulace spočítané dosažené deformace lze po té vyhodnotit lisovatelnost. [9]

### 2.6.3 Metody určení diagramu mezních přetvoření

Diagram mezních přetvoření lze určit jak experimentálními metodami, tak i početními metodami. U početních metod je diagram mezních přetvoření vypočten na základě vztahů odvozených z teorie plasticity a zavedení určitých zjednodušujících předpokladů. Vychází se z materiálových hodnot získaných zkouškami tahem. Diagramy lze počítány pro různé definice mezního stavu. [9]

#### 2.6.3.1 Experimentální metody

Pro určení diagramu mezních přetvoření je nutné získat množství hodnot mezních deformací pro  $m_\phi \in \langle -0,5; 1 \rangle$ . Mezi základní metody experimentálního určení diagramu mezních přetvoření patří zkouška tahem s tyčemi opatřenými vruby, zkouška hydrostatickým vyboulováním a zkouška vypínáním polokulovým tažníkem. Tyto zkoušky se liší náročností jak na přípravu vzorků, požadavky na stroje a nástroje.

#### 2.6.3.2 Zkouška tahem s tyčemi opatřenými vruby

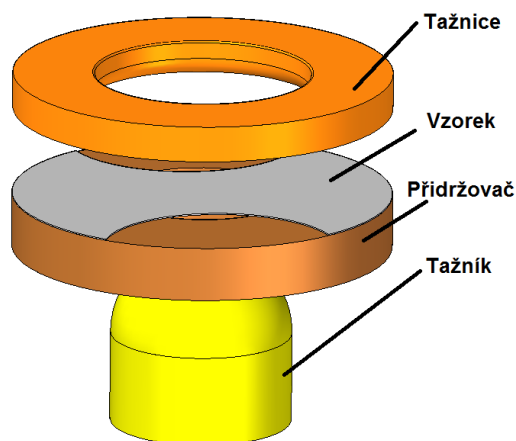
Stav napjatosti se ve zkušební tyči mění pomocí tvaru vrubu. Zkouška je prováděna na běžném trhacím stroji. Nevýhodou této metody je malá plastická oblast s požadovaným stavem napjatosti a tudíž obtížnější vyhodnocení zkoušky. Výhodou této metody je jednoduchá příprava vzorků a malá náročnost na potřebné stroje. Pomocí této metody lze získat pouze levou část FLD diagramu. [9]

#### 2.6.3.3 Zkouška hydrostatickým vyboulováním

Lze ji použít pro pravou část FLD diagramu. Při zkoušce je eliminováno tření. Potřebných přetvoření se docílí použitím různých tvarů tažnic od kruhové až po eliptické s různým poměr os elipsy. Nevýhodou této metody je potřeba sady několika tažnic a zařízení pro vyboulování za pomoci kapaliny. [9]

#### 2.6.3.4 Vypínání pevným polokulovým tažníkem tzv. Nakazima test

Tuto metodu lze využít pro měření obou částí FLD. Princip metody je na obrázku 2.17.



**Obr. 2.17** Nakazima test

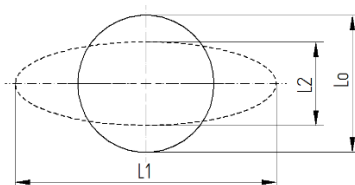
Vzorky jsou vypínány pomocí polokulového tažníku. Vzorky mohou být různě široké pásy plechu, kruhové nástřihy, ze kterých jsou odstřiženy kruhové úseče, nebo tvarově upravené vzorky s proměnnou šířkou. Nevýhodou pásů plechu různé šířky je jejich obtížné vystředění na tažném nástroji, čímž může docházet k jejich sklouznutí z tažníku. Sklouznutí hrozí zejména pro malé šířky. Dále zde dochází zejména u úzkých vzorků ke vzniku praskliny blízko tažné hrany. Problém s vystředěním vzorků lze vyřešit užitím vzorků připravených z kruhových nástřihů. Obě nevýhody odstraňuje až užití vzorků s proměnlivou šíří. Tyto vzorky jsou připravovány z kruhového přístřihu, ze kterého je vystřižen ze dvou stran kruhový segment. Vystřižením kruhového segmentu se mění šířka vzorku v jeho středové části, čímž dojde k různým stavům přetvoření a zároveň dochází k prasknutí vzorku na vrcholu vytaženého vrchlíku. Mezi nevýhody této metody patří velké tření mezi tažníkem a vzorkem zejména u plných přístřihů. [9]

## 2.7 Metody měření deformace

Deformaci vzniklou po tváření lze měřit metodou deformačních sítí nebo pomocí optických systémů. Výhodou optických systémů je možnost sledování průběhu deformace materiálu za předpokladu přímého výhledu na deformovaný díl. U metody deformačních sítí jsme schopni určit pouze koncový stav deformace, ale výhodou je, že nepotřebujeme přímý výhled na deformovaný díl.

### 2.7.1 Metoda deformačních sítí

Princip této metody spočívá v nanesení vhodnou metodou deformační sítě na plech před jeho deformováním. Po deformaci vyhodnocujeme zdeformovanou síť. Deformační síť lze nanést pomocí tištění, leptání, mechanicky. U deformačních sítí vytvořených mechanicky, převážně rytím dochází vlivem změny drsnosti povrchu k ovlivnění procesu tažení. Síť může být různého tvaru, jako nejvýhodnější se jeví síť ve tvaru kruhů. Velikost elementů deformační sítě je volena dle požadované přesnosti. Tato síť se deformuje na elipsu, osy elipsy nám zároveň udávají směr hlavních deformací, viz obrázek 2.18. Metoda deformačních sítí má nevýhodu v tom, že můžeme hodnotit pouze rozdíl mezi výchozím a konečným stavem. Výhodou této metody je její cenová nenáročnost. [2]



**Obr. 2.18** Schéma měření deformace

**Výpočet deformace:**

$$\varphi_{1,2} = \ln \frac{L_{1,2}}{L_0} \quad [-] \quad (16)$$

Kde:

$L_{1,2}$	-	délky osy elipsy po deformaci	[mm]
$L_0$	-	průměr sítě před deformací	[mm]

## 2.7.2 Optické měřicí systémy

V dnešní době je rozšířené velké množství optických systému. S jejich pomocí lze měřit 3D tvar objektů, sledovat průběh deformace materiálu. Tyto systémy jsou založeny na digitálním zpracování obrazu. Mezi nejznámější výrobce patří německá firma GOM a její měřicí systémy Pontos, Aramis a Argus.

### 2.7.2.1 Měřicí systém Argus

Měřicí systém Argus slouží především k optimalizaci tvářecích procesů. Lze získat zejména hodnoty o geometrii měřeného dílu, hlavní a vedlejší přetvoření a údaje o redukci tloušťky. Systém Argus využívá pouze jeden fotoaparát o vysokém rozlišení, viz obrázek 2.19 a, je schopen vyhodnocovat reálné vzorky, viz obrázek 2.19 b. Na povrch materiálu je elektrochemicky nebo za pomoci laseru nanесena síť měřících bodů. Po deformaci jsou na výlisek dané kalibrační měřky, které umožňují vyhodnocení. Systém lze využít jak na malé tak i velké vzorky. [11, 12]



**Obr. 2.19** Argus a) kamera b) příklad vyhodnoceného dílu [11, 12]

### 2.7.2.2 Měřicí systém Aramis

Aramis slouží k 3D měření. Je ho možné využít pro statické a dynamické děje. Výhodou tohoto systému je snadná příprava vzorků. Výpočet souřadnic probíhá na povrchu vzorku, pokud je na něm nanesen kontrastní vzor takzvaný pattern. Pattern musí mít schopnost se deformovat spolu s měřeným vzorkem. Výpočet souřadnic lze také provádět pouze v referenčních bodech.

Systém pracuje na principu snímání obrazu dvěma digitálními kamerami, umístěnými na společném rámu. Systém před vlastním měřením musí být kalibrován pomocí kalibrační destičky. [11, 12]



**Obr. 2.20** Měřicí systém Aramis [11]

### 3 Experimentální část

Na základě požadavku škoda Auto byla vypracována předkládaná DP s cílem komplexního hodnocení tvářitelnosti dvou materiálů s označením DC06 ZE50/50 BPO (označení dle normy ČSN EN 10152) kde:

- DC - ploché výrobky k tváření za studena, válcováno za studena
- 06 - třída hlubokotažnosti
- Z - elektrolyticky zinkováno
- 50/50 - tloušťka povlaku, v tomto případě 5,0 [μm]
- B - druh povrchu
- PO - fosfátovaný a olejovaný

Jedná se o hlubokotažný materiál. Materiál je určen zejména pro tvarově náročné díly karoserie. U jednoho materiálu dochází k vadám během lisování a u druhého nikoliv. Z materiálu byl lisován rám dveří pro Škodu Karoq, Pro naplnění cílů DP byly provedeny tyto zkoušky:

- Statická zkouška tahem
- Měření normálové anizotropie
- Zkouška rozšiřování otvoru
- Zkoušky tribologie
- Měření FLC křivek
- Metalografické výbrusy

Následně byly výsledky každé zkoušky zhodnoceny a oba materiály mezi sebou porovnány. Dále v textu jsou materiály pro zjednodušení označovány:

- 1) DC06 (OK) - lisovatelný
- 2) DC06 (NOK) - vadný

## Postup výroby rámu dveří

Rám je vyráběn v několika postupných operacích. Rám je na obrázku 3.1. V první operaci je vystřižen nástřih tvarovou raznicí ze svitku plechu. Následuje automatické přesunutí přístřihu z pásového dopravníku do nástroje, kde následuje druhá operace, hluboké tažení základního tvaru do plné hloubky. V třetí operaci byl odstřižen obvod výtažku, také byl tvarován rádius hrany dveří a také docházelo k děrování otvorů. Při čtvrté operaci následuje ohýbání podběhu, tvarování partie zadního světla, předechnutí c-sloupku a oblasti prahu, ohnutí odtokového kanálu a čelního skla. V průběhu páté operace dochází k tvarování klínem v oblasti prahu. V šesté operaci následuje kalibrování v oblasti prahu a střechy. Zároveň dochází k děrování a vyhrdlení RPS otvorů, dále k ražení čísla, loga a týdenního značení. V poslední sedmé operaci následuje finální kalibrování klínem v partii těsnicího kanálu. Dále odstřižení na čisto v partii střechy a čelního okna a uložení na vynášecí pás. Následuje kontrola dílu.



**Obr. 3.1** Rám dveří Škoda Karoq



### 3.1 Statická zkouška tahem

Z obou testovaných materiálů byly zhotoveny ploché zkušební tyče pro statickou zkoušku tahem. Tyto vzorky byly vyhotoveny vystřihováním. Vzorky byly odebrány s ohledem na směr válcování ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Statická zkouška tahem byla provedena pro pět vzorků od každého směru pro oba materiály. Statická zkouška tahem byla provedena na trhacím stroji TIRA test 2300. Pracovní prostor trhacího stroje je na obrázku 3.2. Vyhodnocované údaje ze statické zkoušky tahem byly mez kluzu a mez pevnosti, homogenní a celková tažnost.



**Obr. 3.2** Pracovní prostor trhacího stroje TIRA test 2300

### 3.1.1 Vyhodnocení statické zkoušky tahem

Naměřené hodnoty zkouškou tahem byly uspořádány do tabulek. Vždy je uvedena průměrná hodnota a její směrodatná odchylka. Následně byla spočtena průměrná hodnota  $\bar{x}$  ze všech směrů, dle vzorce 17. Naměřené hodnoty pro materiál DC06 (OK) jsou uvedeny v tabulce 1, pro materiál DC06 (NOK) jsou výsledné hodnoty v tabulce 2. Protokoly ze zkoušky tahem jsou uvedeny v příloze.

**Průměrná hodnota:**

$$\bar{x} = \frac{1}{4} \cdot (X_{0^\circ} + 2 \cdot X_{45^\circ} + X_{90^\circ}) \quad (17)$$

Kde:

- $X_{0^\circ}$  - hodnota pro směr  $0^\circ$
- $X_{45^\circ}$  - hodnota pro směr  $45^\circ$
- $X_{90^\circ}$  - hodnota pro směr  $90^\circ$

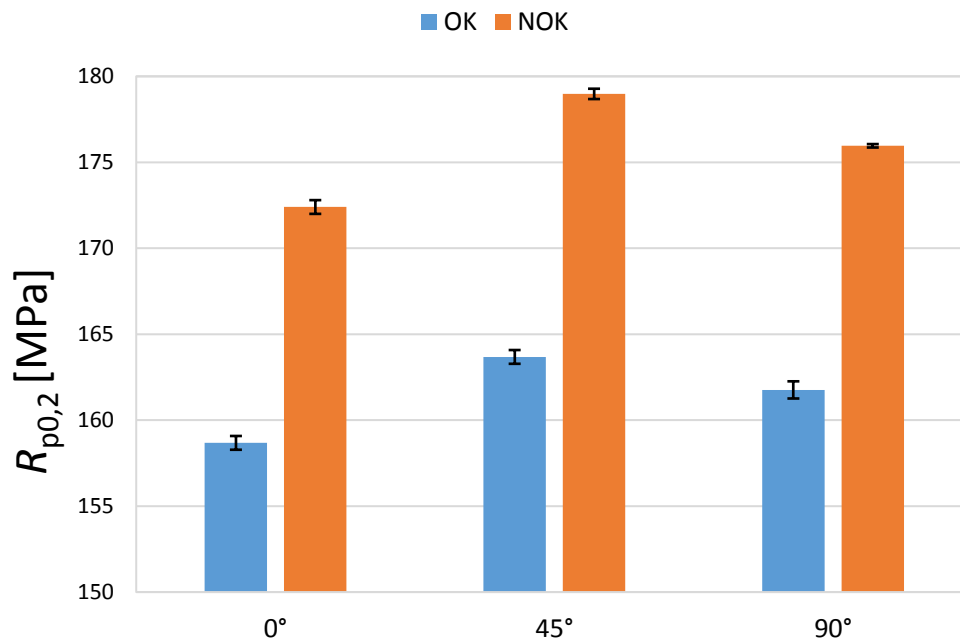
**Tab. 1** DC06 - OK Základní mechanické vlastnosti

Směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
$0^\circ$	$158,7 \pm 0,4$	$303,8 \pm 0,4$	$26,2 \pm 0,3$	$44,5 \pm 0,4$
$45^\circ$	$163,7 \pm 0,4$	$306,7 \pm 0,5$	$25,0 \pm 0,7$	$43,5 \pm 0,8$
$90^\circ$	$161,8 \pm 0,5$	$299,8 \pm 0,4$	$25,3 \pm 0,3$	$45,6 \pm 3$
$\bar{x}$	162,0	304,3	25,4	44,3

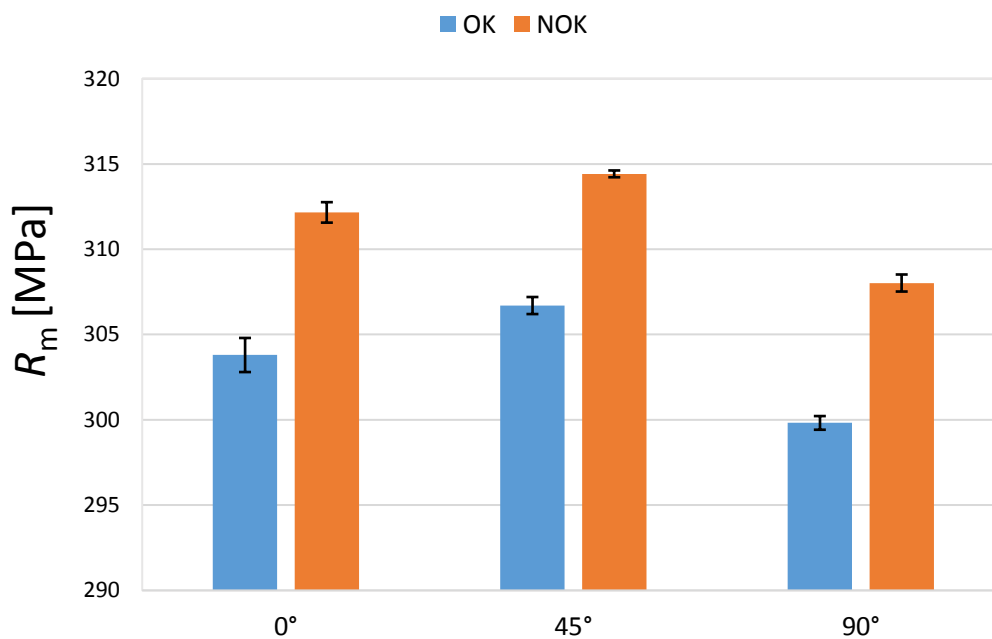
**Tab. 2** DC06 - NOK Základní mechanické vlastnosti

Směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
$0^\circ$	$172,4 \pm 0,4$	$312,2 \pm 0,6$	$24,5 \pm 0,4$	$42,5 \pm 0,6$
$45^\circ$	$179,0 \pm 0,3$	$314,4 \pm 0,2$	$23,2 \pm 0,4$	$41,5 \pm 1$
$90^\circ$	$176,0 \pm 1$	$308,0 \pm 0,5$	$23,5 \pm 0,3$	$44,0 \pm 2$
$\bar{x}$	176,6	312,3	22,6	42,2

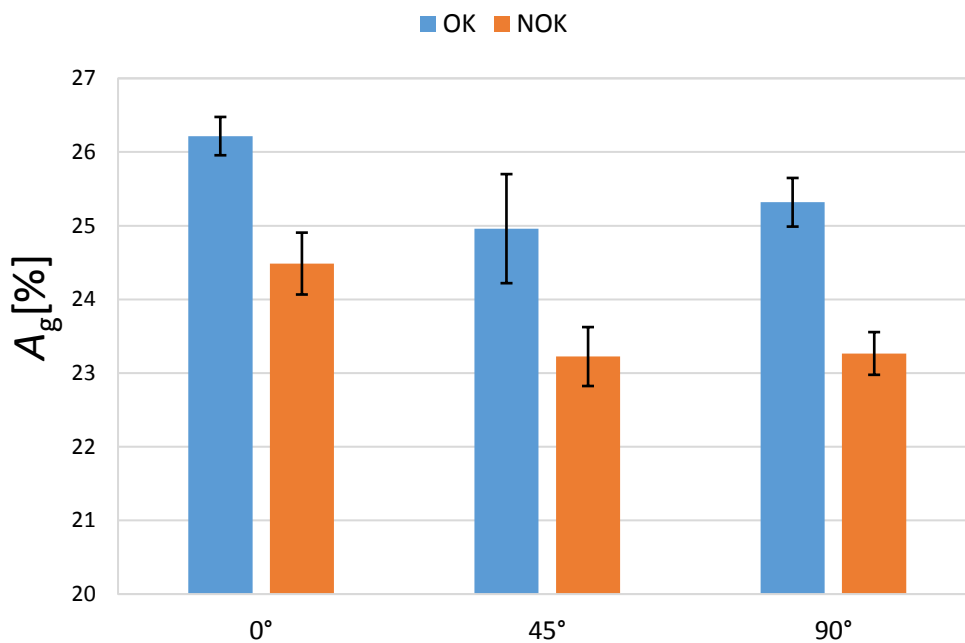
Pro přehledné porovnání obou materiálů byly sestaveny sloupcové grafy porovnávající vždy jednu materiálovou vlastnost pro oba materiály a všechny měřené směry. V grafech je uvedena také příslušná směrodatná odchylka. Graf pro smluvní mez kluzu viz obrázek 3.3, mez pevnosti viz obrázek 3.4, homogenní tažnost viz obrázek 3.5 a celková tažnost je na obrázku 3.6.



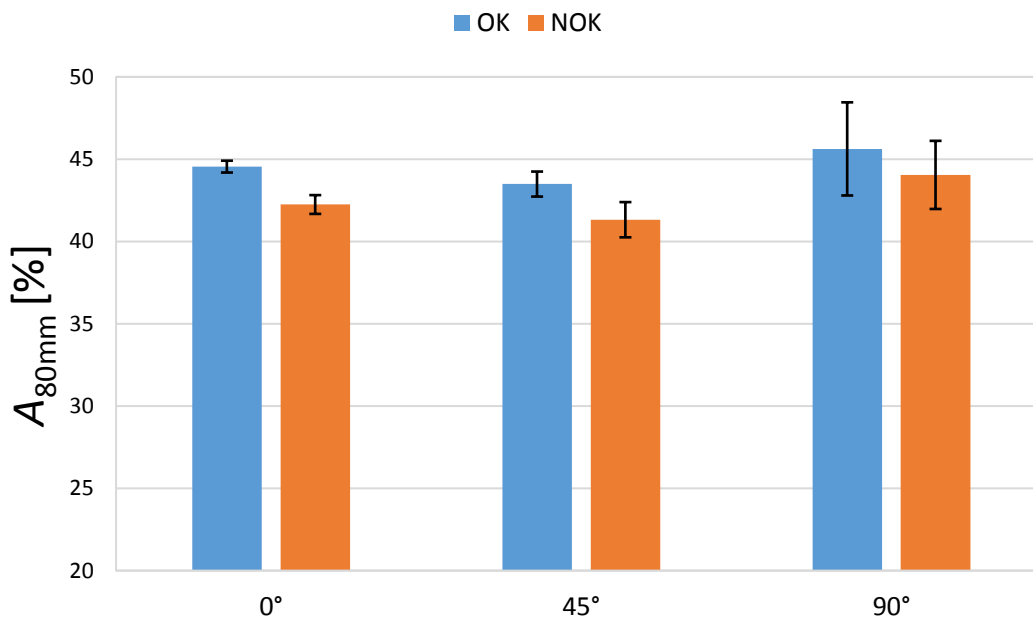
**Obr. 3.3** DC06 - Smluvní meze kluzu



**Obr. 3.4** DC06 - Mez pevnosti



**Obr. 3.5** DC06 - Homogenní tažnost



**Obr. 3.6** DC06 - Celková tažnost

Naměřené hodnoty byly podrobeny statistickému testu střední hodnoty, s hladinou významnosti  $\alpha = 5 \%$ . Byl užit oboustranný studentův t-test. U testovaných hodnot předpokládáme stejné rozložení hodnot se shodným rozptylem. Testem byly porovnány hodnoty od obou materiálů, jestli mezi nimi je statisticky významný rozdíl. Testem porovnáváme rozdílnost středních hodnot obou souborů a tím platnost hypotézy  $H_0$ , viz vzorec 18. Výsledky testů jsou shrnuty v tabulce 3. Pokud test prokázal statistickou rozdílnost na hladině významnosti  $\alpha = 5 \%$ , tak je hypotéza o rovnosti střední hodnoty zamítnuta a předpokládáme platnost alternativní hypotézy  $H_1$ . Pokud nebyla prokázána statistická rozdílnost, tak je hypotéza  $H_0$  o rovnosti středních hodnot přijata. [14]

**Statistické hypotézy:** (18)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

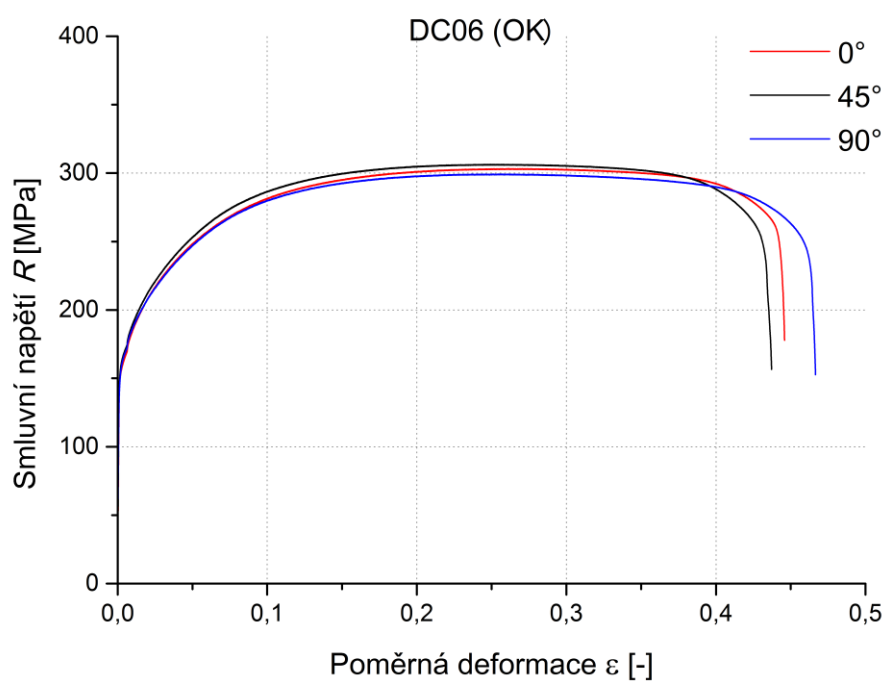
Kde:

- $H_0$  - mezi středními hodnotami není statistický rozdíl
- $H_1$  - alternativní hypotéza
- $\mu_1$  - střední hodnoty prvního souboru
- $\mu_2$  - střední hodnota druhého souboru

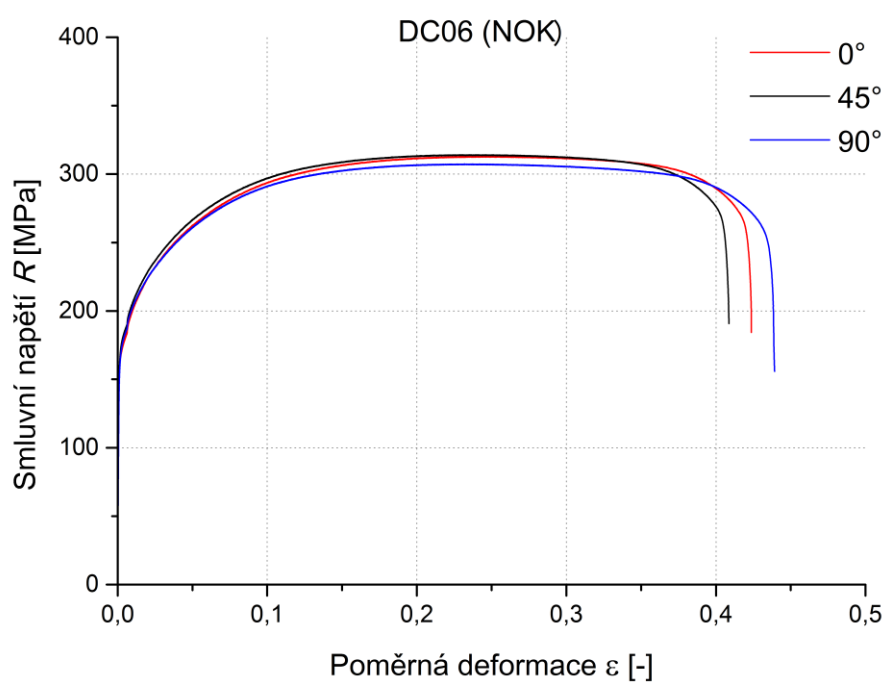
**Tab. 3** T- test: Statická zkouška tahem – stav hypotézy  $H_0$

Směr	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
0°	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Přijata
45°	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta
90°	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta	Zamítnuta

Průměrné hodnoty získané statickou zkouškou tahem byly následně pro jednotlivé směry vyneseny do grafu pro lepší přehlednost a porovnání jednotlivých směrů mezi sebou. Pro materiál DC06 (OK) viz obrázek 3.6, a pro materiál DC06 (NOK) viz obrázek 3.7.



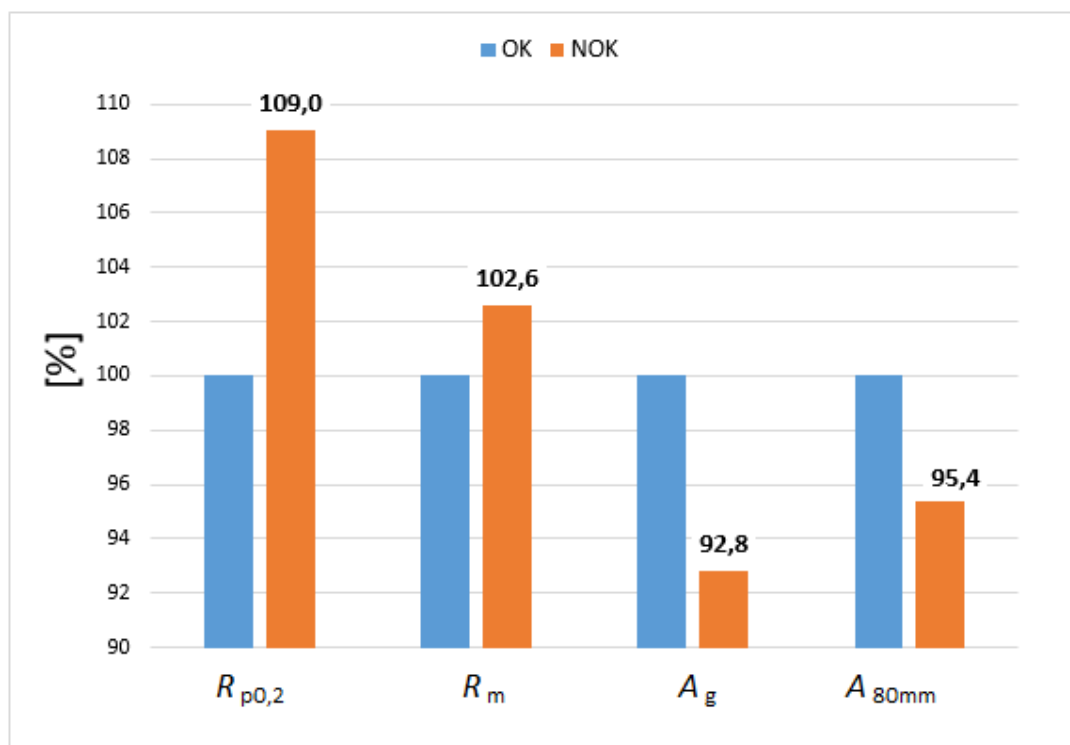
**Obr. 3.7** DC06 - OK Zkouška tahem jednotlivé směry



**Obr. 3.8** DC06 – NOK Zkouška tahem jednotlivé směry

### 3.1.2 Diskuze výsledků statické tahové zkoušky

I přes to, že oba materiály splňují normou dané mechanické hodnoty, vykazují oba testované materiály určité rozdíly. Na obrázku 3.9 jsou ve formě sloupcových grafů porovnány průměrné mechanické vlastnosti získané pomocí statické zkoušky tahem. Naměřené mechanické hodnoty materiálu DC06 (OK) byly vždy brány jako základ pro porovnání obou materiálů. Z grafu je patrné, že materiál DC06 (NOK) vykazuje o 9 % (15 MPa) vyšší mez kluzu a o 2,6 % (8 MPa) vyšší mez pevnosti než materiál DC06 (OK). Dále pak můžeme sledovat nižší hodnoty tažnosti materiálu DC06 (NOK) oproti materiálu DC06 (OK). Homogenní tažnost materiálu DC06 (NOK) byla nižší o 7,2 % a celková tažnost nižší o 4,6 % vzhledem k materiálu DC06 (OK). Rozdílné mechanické vlastnosti zjištěné pomocí statické zkoušky tahem byly testovány pomocí tzv. Studentova testu střední hodnoty na hladině významnosti  $\alpha = 5 \%$ . Rozdílné naměřené výsledky byly shledány jako statisti rozdílné (viz tabulka 3).



**Obr. 3.9** Porovnání vlastností DC06(OK) a DC06(NOK)

### 3.2 Měření normálové anizotropie

Normálová anizotropie byla měřena na vzorcích, jejichž tvar a rozměr odpovídá normě ČSN ISO 6892. Vzorky byly odebrány s ohledem na směr válcování ve směrech 0°, 45° a 90° pro oba materiály. Pro každý směr byly měřeny 4 vzorky. Hodnota koeficientu normálové anizotropie byla měřena při deformaci 20%, což odpovídá protažení vzorku 16 mm při zvolené počáteční měřené délce  $l_0 = 80$  mm. Pro potřeby zjištění koeficientu normálové anizotropie je nutné měřit šířku a délku vzorku před a po deformaci. Pro tyto účely byl vzorek orýsován ryskami ve vzdálenosti 10 mm. Potřebné rozměry byly měřeny na Abbeho délkoměru (rozměr délky) a pomocí digitálního úchylkoměru Mitutoyo (rozměr šířky). Uspořádání měřícího přípravku je vidět na obrázku 3.10. Šířka vzorku byla měřena na 3 místech.



Obr. 3.10 Měření šířky

Následně byl z průměrných hodnot změn rozměrů pro jednotlivé směry válcování vypočten dle vzorce 19 koeficient normálové anizotropie.

**Koeficient normálové anizotropie:**

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_l + \varphi_b)} = \frac{\ln\left(\frac{b_0}{b}\right)}{\ln\left(\frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}\right)} \quad [-] \quad (19)$$

Kde:

$r$	-	koeficient normálové anizotropie	$[-]$
$\varphi_b$	-	deformace ve směru šířky	$[-]$
$\varphi_l$	-	deformace ve směru délky	$[-]$
$\varphi_s$	-	deformace ve směru tloušťky	$[-]$



$b_0$	-	počáteční šířka vzorku	[mm]
$b$	-	šířka po natažení	[mm]
$l_0$	-	výchozí délka	[mm]
$l$	-	délka po natažení	[mm]

### 3.2.1 Vyhodnocení normálové anizotropie

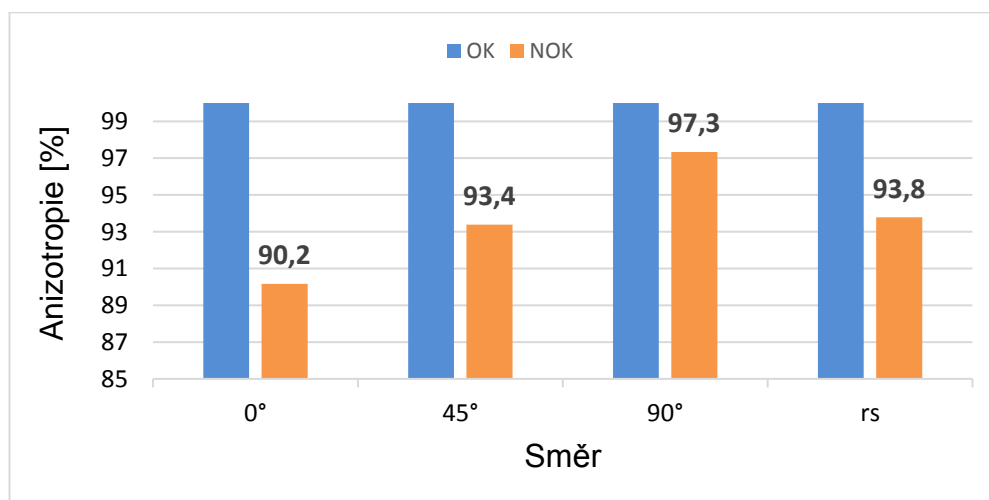
Průměrné hodnoty normálové anizotropie byly pro lepší přehlednost zobrazeny v tabulce 4. V tabulce je také uvedena střední hodnota normálové anizotropie vypočítána dle vztahu (17).

**Tab. 4** Hodnoty normálové anizotropie

Směr	OK	NOK
0°	$2,06 \pm 0,01$	$1,86 \pm 0,02$
45°	$1,93 \pm 0,04$	$1,81 \pm 0,01$
90°	$2,54 \pm 0,03$	$2,48 \pm 0,08$
rs	2,12	1,98

### 3.2.2 Diskuze výsledků měření normálové anizotropie

V grafu na obrázku 3.10 jsou porovnány hodnoty normálové anizotropie, porovnání je v procentech, jako základ je brán materiál DC06 (OK). Jak je patrné z hodnot na obrázku 3.10, tak materiál DC06 (NOK) má nižší hodnoty normálové anizotropie. Pro směr 0° je rozdíl nejvýraznější a to je 9,8 %. Střední hodnota normálové anizotropie je u materiálu DC06 (NOK) nižší a to o 6,2 %.

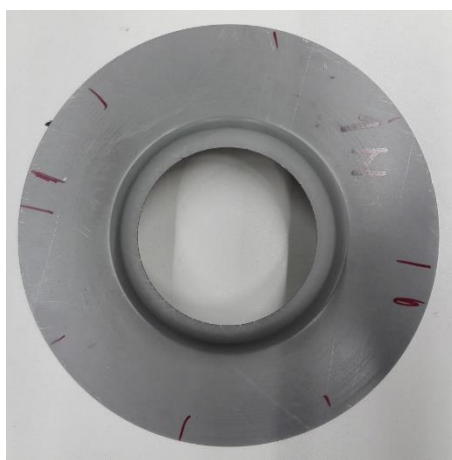


**Obr. 3.10** DD06 Porovnání koeficientu normálové anizotropie

### 3.3 Zkouška rozšiřování otvoru

Nejprve byly vystřiženy plné kruhové přístřihy průměru 210 mm z obou zkoumaných materiálů. Následně byl vystřižen na středu otvor o průměru  $D_0 = 35$  mm. Při vystřihování otvoru baly měněna střížná mezera a to na hodnoty 1, 10, 20, 30, 40, 50 % z tloušťky materiálu. Různé střížné mezery bylo docíleno výměnou střížníků.

Následně takto připravené vzorky od obou materiálů byly rozšiřovány na lisu do vzniku první trhliny na střížné hraně. Ukázka vzorku po zkoušce je na obrázku 3.11.



**Obr. 3.11** Vzorek po zkoušce rozšiřování

Po rozšiřování byl měřen průměr rozšířeného otvoru pomocí posuvného měřítka. Průměr byl měřen na 4 místech a to ve směrech  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $45^\circ$ . Z průměrných hodnot, průměrů po zkoušce pro danou střížnou mezeru, byla následně vypočtena dle vzorce 20 logaritmická deformace.

**Logaritmická deformace:**

$$\varphi = \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad [1] \quad (20)$$

Kde:

D	-	průměr po zkoušce	[mm]
$D_0$	-	počáteční průměr	[mm]

### 3.3.1 Vyhodnocení zkoušky rozšiřování otvoru

Průměrné hodnoty naměřených průměrů pro jednotlivé střížné mezery a jím odpovídající deformace jsou uvedeny v tabulce 5 pro materiál DC06 (OK) a v tabulce 6 pro materiál DC06 (NOK).

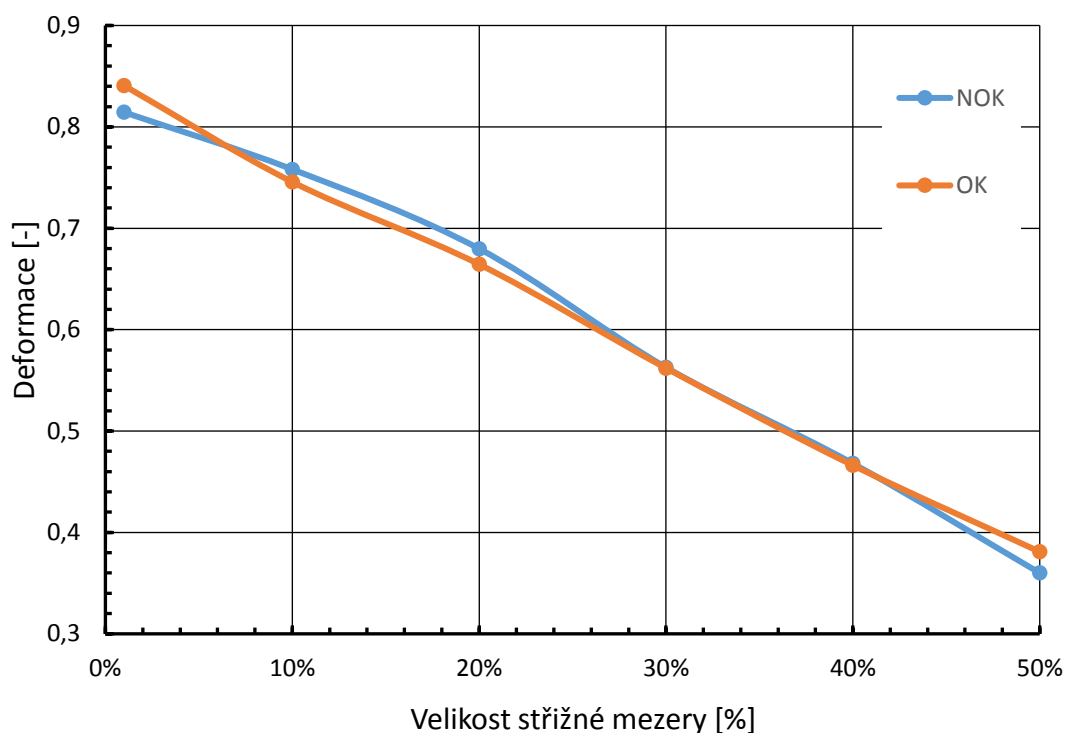
**Tab. 5** Zkouška rozšiřování otvoru DC06 (OK)

Střížná mezera [%]	1	10	20	30	40	50
Průměrná hodnota průměru po zkoušce [mm]	81 ± 2	74 ± 1	68 ± 1	61 ± 2	56 ± 1	51 ± 1
Deformace [-]	0,84	0,75	0,66	0,56	0,47	0,38

**Tab. 6** Zkouška rozšiřování otvoru DC06 (NOK)

Střížná mezera [%]	1	10	20	30	40	50
Průměrná hodnota průměru po zkoušce [mm]	79 ± 0,4	75 ± 2	69 ± 1	61 ± 2	56 ± 0,5	50 ± 0,6
Deformace [-]	0,81	0,76	0,68	0,56	0,47	0,36

Hodnoty dosažených logaritmických deformací v závislosti na velikosti střížné mezery jsou vyneseny do grafu, viz obrázek 3.12.



**Obr. 3.12** Závislost dosažené deformace na velikosti střížné mezery

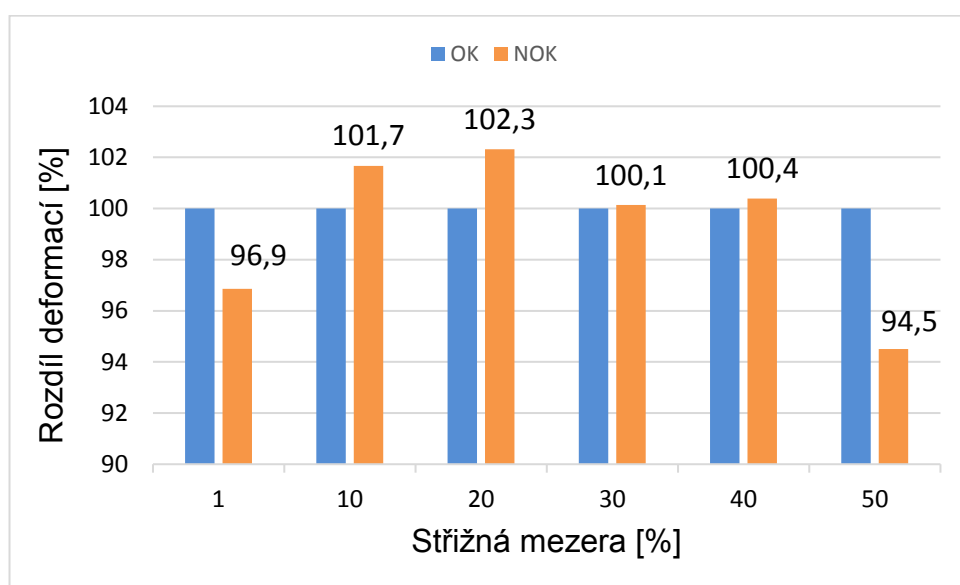
Jednotlivé hodnoty naměřených průměrů vždy pro danou střížnou mezeru byly mezi sebou otestovány na rovnost střední hodnoty. Pro test byl využit studentův t-test na střední hodnotu s rovností rozptylů obou souborů. Hladina významnosti testu byla zvolena  $\alpha = 5\%$ . Formulace hypotéz viz rovnice 18. Stav hypotézy o rovnosti středních hodnot je v tabulce 7. Pokud test prokázal statistickou rozdílnost na hladině významnosti 5%, tak je hypotéza o rovnosti střední hodnoty  $H_0$  zamítnuta a je přijata alternativní hypotéza  $H_1$ . Pokud nebyla prokázána statistická rozdílnost, tak je hypotéza o rovnosti středních hodnot přijata.

**Tab. 7** T-test: Zkouška rozšiřování otvoru

Střížná mezera [%]	1	10	20	30	40	50
Stav hypotézy $H_0$	zamítnuta	přijata	přijata	přijata	přijata	zamítnuta

### 3.3.2 Diskuze výsledků zkoušky rozšiřování otvoru

Jak je patrné z grafu na obrázku 3.13, tak průběh závislosti dosažené deformace na velikosti střížné mezery je u obou testovaných materiálů téměř totožný. V grafu je vidět procentuální rozdíl dosažené deformace, jako základ je brán materiál DC06 (OK). Pouze pro hodnoty střížné mezery 1 % a 50 % tloušťky stříhaného materiálu byla prokázána na základě statistiky na hranici významnosti  $\alpha = 5 \%$  rozdílnost ve prospěch materiálu DC06 (OK). Tento rozdíl činí 3,1 % pro mezeru 1 % a pro mezeru 50 % byl rozdíl 5,5 % oproti materiálu DC06 (NOK). Rozdíly jsou pro technickou praxi zanedbatelné.



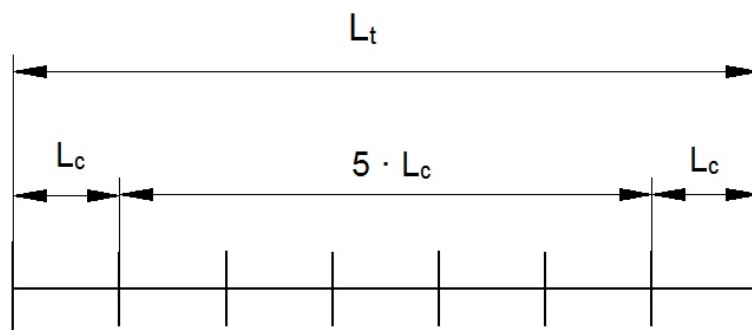
Obr. 3.13 Zkouška rozšiřování otvoru - porovnání materiálu

### 3.4 Mění koeficientu tření

Před samotným měřením tření bylo provedeno měření drsnosti. Drsnost byla měřena ručním drsnoměrem od firmy Mahr MarSurf PS1, viz obrázek 3.14. Drsnost byla u obou materiálů měřena z obou stran plechu. Drsnost byla měřena vždy na celkové vzdálenosti  $L_t = 17,5 \text{ mm}$ , drsnoměr provedl automaticky sedm měření, viz obrázek 3.15. Do výsledku se počítalo pouze pět středních měření. Z parametrů drsnosti byly zaznamenávány střední aritmetická hodnota drsnosti  $R_a$  a počet výstupků  $RP_c$ . Drsnost byla měřena kolmo na směr válcování. Měření bylo provedeno na každém vzorku na třech místech z obou stran.

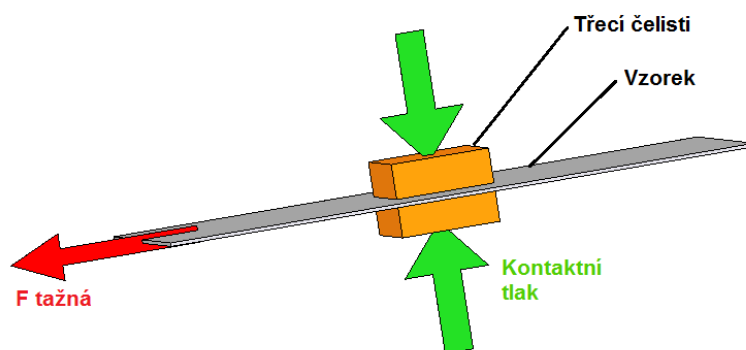


Obr. 3.14 Drsnoměr MarSurf PS1



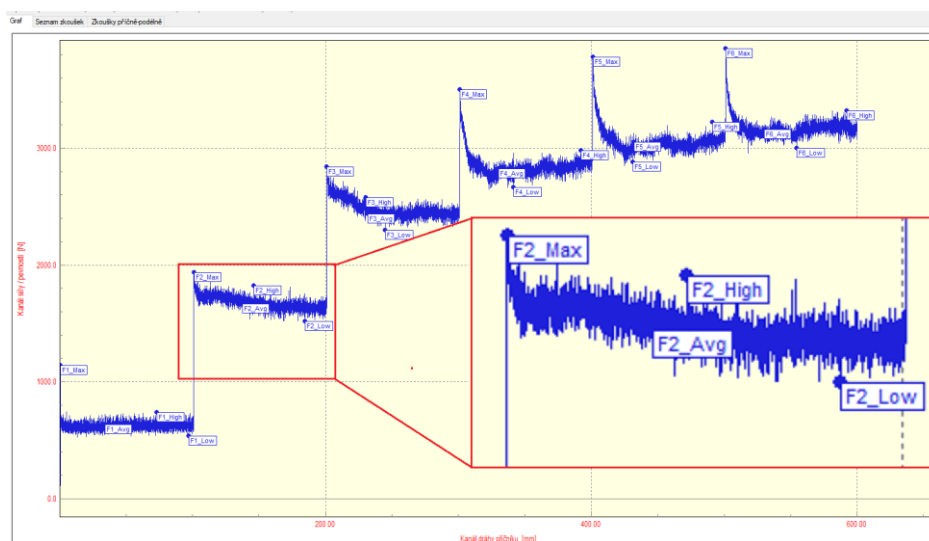
Obr. 3.15 Schéma měření drsnosti

Pro měření tření byly připraveny pásy plechu umožňující měření tření v délce 600 mm. Tření bylo měřeno na jednoúčelovém zařízení SOKOL 400. Před měřením byly vzorky důkladně odmaštěny v odmašťovací lázni C-Sol (viz příloha B). Před měřením byl na vzorky nanesen prací olej Anticorit PL3802-39LV výrobce Fuchs. Schéma měření tření viz obrázek 3.16.



Obr. 3.16 Schéma měření koeficientu tření

Vzorek byl sevřen v čelistích o rozměru 20 x 20 mm z materiálu GGG70L. Při měření byla držena konstantní rychlost posuvu pásu plechu a to 1 mm/s. Během měření byla zaznamenávána tažná síla. V průběhu měření byl měněn kontaktní tlak na čelisti. Hodnoty tlaků v průběhu měření byly (8, 23, 38, 53, 68, 83) MPa. Průběh záznamu síly pro materiál DC06 (OK) je na obrázku 3.17. Výpočet koeficientu tření byl proveden dle vzorce 20, za  $F_{\text{tažná}}$  byly dosazeny naměřené hodnoty  $F_{\text{High}}$  a  $F_{\text{Avg}}$ , viz obrázek 3.17. Tažná síla byla zaznamenávána o frekvenci 2 kHz.



Obr. 3.17 DC06 (OK) - Průběh síly

**Koeficient tření:**

$$\mu = \frac{F_{\text{tažná}}}{2 \cdot S \cdot p} \quad [-] \quad (20)$$

Kde:

$\mu$	-	koeficient tření	[-]
$F_{\text{tažná}}$	-	tažná síla	[N]
$S$	-	plocha čelisti	[mm <sup>2</sup> ]
$p$	-	kontaktní tlak	[MPa]

### 3.4.1 Výsledky měření koeficientu tření a drsnosti

Naměřené hodnoty drsností jsou vyobrazeny v tabulkách. Pro materiál DC06 (OK) viz tabulka 8 a pro materiál DC06 (NOK) tabulka 9. První strana u každého materiálu je strana hladší, druhá strana je stranou s vyšší drsností.

**Tab. 8** Drsnost DC06 (OK)

OK	1. strana		2. strana	
Vzorek	Ra	RPc	Ra	RPc
1.	1,254	80	1,266	97
2.	1,152	82	1,263	96
3.	1,194	83	1,24	98
4.	1,175	86	1,326	80
5.	1,296	92	1,326	90
6.	1,172	90	1,286	88
7.	1,266	88	1,36	88
8.	1,136	91	1,296	97
9.	1,319	86	1,377	93
$\bar{x}$	$1,22 \pm 0,1$	$86 \pm 4$	$1,30 \pm 0,04$	$92 \pm 6$

**Tab. 9** Drsnost DC06 (NOK)

NOK	1. strana		2. strana	
Vzorek	Ra	RPc	Ra	RPc
1.	1,408	72	1,775	58
2.	1,648	62	1,746	63
3.	1,44	69	1,663	64
4.	1,4	72	1,363	65
5.	1,427	64	1,419	69
6.	1,394	71	1,452	70
7.	1,607	68	1,598	65
8.	1,629	64	1,576	65
9.	1,452	69	1,383	66
$\bar{x}$	$1,49 \pm 0,1$	$68 \pm 4$	$1,55 \pm 0,1$	$65 \pm 3$

Naměřené hodnoty středních aritmetických hodnot drsnosti Ra a hodnoty počtu výstupků RPc byly podrobeny statistickému testu. Testována byla hypotéza o rovnosti středních hodnot, viz vzorec 18, na hranici významnosti  $\alpha = 5 \%$ . Jako statistický nástroj byl použit oboustranný studentův t-test, za předpokladu rovnosti rozptylů. Výsledky testu jsou uvedeny v tabulce 10. Pokud test prokázal statistickou rozdílnost na hladině významnosti 5 %, tak



je hypotéza  $H_0$  o rovnosti střední hodnoty zamítnuta. Pokud nebyla prokázána statistická rozdílnost, tak je hypotéza o rovnosti středních hodnot přijata.

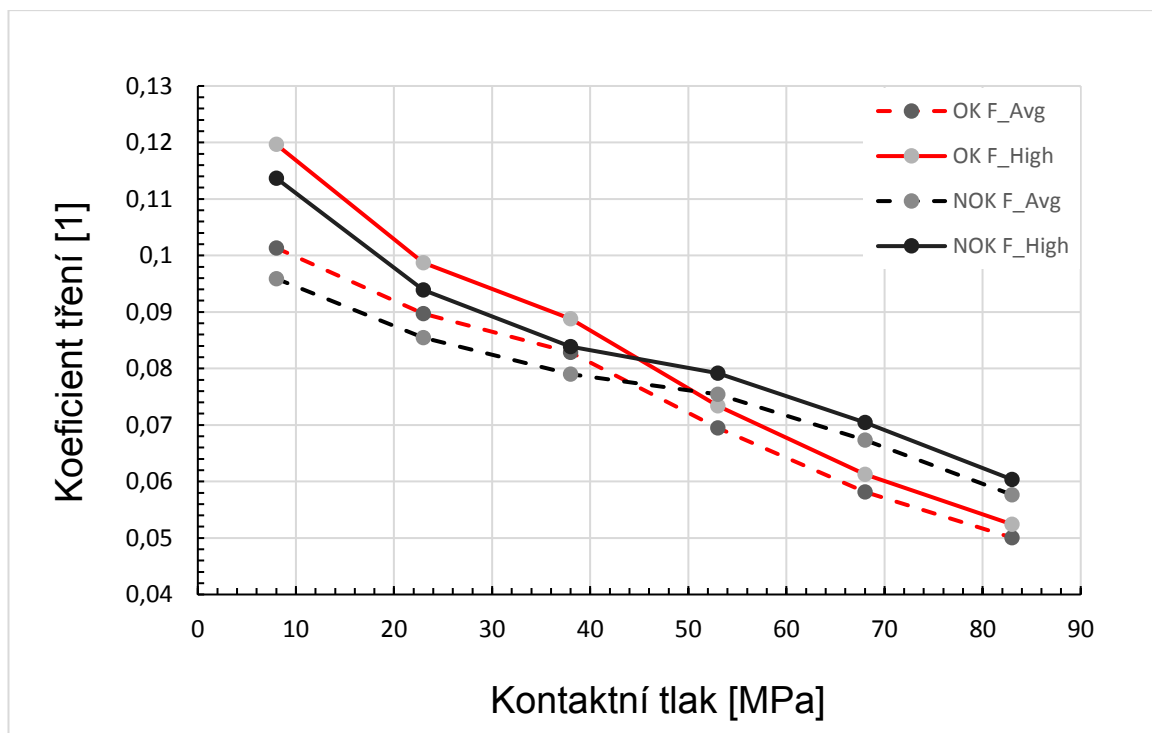
**Tab. 10** T- test: Měření drsnosti povrchu

DC 06	1. strana		2. strana	
	Ra	RPc	Ra	RPc
Stav hypotézy $H_0$	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta	zamítnuta

Vypočtené hodnoty koeficientů tření jsou uvedeny v tabulce 10. Výsledné hodnoty koeficientů tření pro oba testované materiály byly pro lepší názornost vyneseny do grafu v závislosti na kontaktním tlaku mezi měřeným materiálem a třecími čelistmi. Do grafu byly vyneseny jak hodnoty koeficientů tření pro průměrné hodnoty tažné síly  $F_{Avg}$  tak pro hodnoty maximální tažné síly  $F_{High}$ . Porovnání materiálu viz obrázek 3.18.

**Tab. 10** DC06 - Hodnoty koeficientů tření

Kontaktní tlak [MPa]	8	23	38	53	68	83
OK $F_{Avg}$	0,101	0,090	0,083	0,069	0,058	0,050
OK $F_{High}$	0,120	0,099	0,089	0,073	0,061	0,052
NOK $F_{Avg}$	0,096	0,085	0,079	0,075	0,067	0,058
NOK $F_{High}$	0,114	0,094	0,084	0,079	0,070	0,060



Obr. 3.18 DC06 - Porovnání koeficientů tření

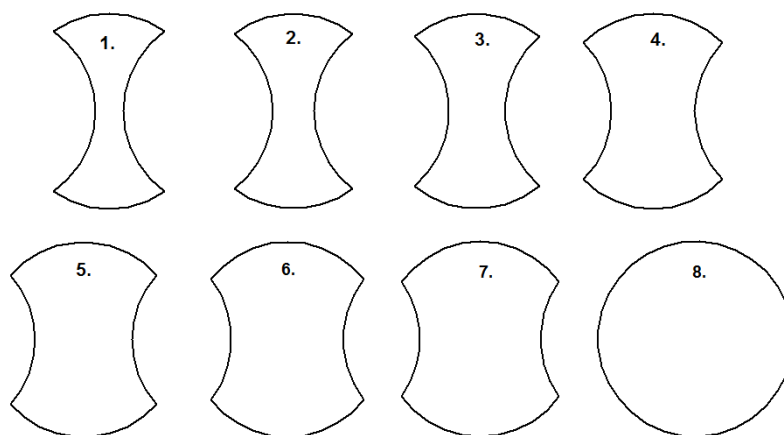
### 3.4.2 Diskuze výsledků měření tření a drsnosti povrchu

U materiálu DC06 (OK) byla naměřena nižší střední aritmetická hodnota drsnosti než u materiálu DC06 (NOK) a to o  $0,3 \mu\text{m}$ , (23 %) pro stranu s nižší drsností a na straně s vyšší drsností byl rozdíl 23,1 %. Počet výstupků  $\text{RpC}$  byl nižší u materiálu DC06 (NOK) a to o 18 (20,9 %) na straně s nižší drsností a na straně s vyšší drsností byl rozdíl o 22 (29,3 %). Ze statistického hlediska byl prokázán rozdíl, při významnosti testu  $\alpha = 5 \%$ .

Jak vyplývá z obrázku 3.18, tak materiál DC06 (OK) má do kontaktního tlaku 45 MPa nepatrně vyšší koeficient tření, a to o 5,4 % pro kontaktní tlak 8 MPa a hodnotu síly  $F_{\text{Avg}}$  pro sílu  $F_{\text{High}}$  je rozdíl 5 %. Při dalším zvýšení tlaku vychází už hůře materiál DC06 (NOK). Zde má materiál DC06 (OK) při kontaktním tlaku 83 MPa nižší koeficient tření o 15,2 % pro  $F_{\text{Avg}}$  a o 15,1 % pro  $F_{\text{High}}$ .

### 3.5 Měření FLD diagramu

Pro měření FLD diagramu bylo využito takzvaného Nakazima testu, jedná se o vypínání pevným polokulovým tažníkem. Různých ukazatelů stavu přetvoření bylo docíleno tvarovými přístřihy, viz obrázek 3.19. Nejdříve byly vystřiženy kruhové přístřihy, o průměru 210 mm, následně byla z každého vzorku symetricky odstřižena kruhová část na požadovanou geometrii vzorku. Hodnoty nejužšího místa jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 11. Pro oba materiály byla připravena stejná série vzorků, od každé geometrie byly měřeny 4 vzorky.

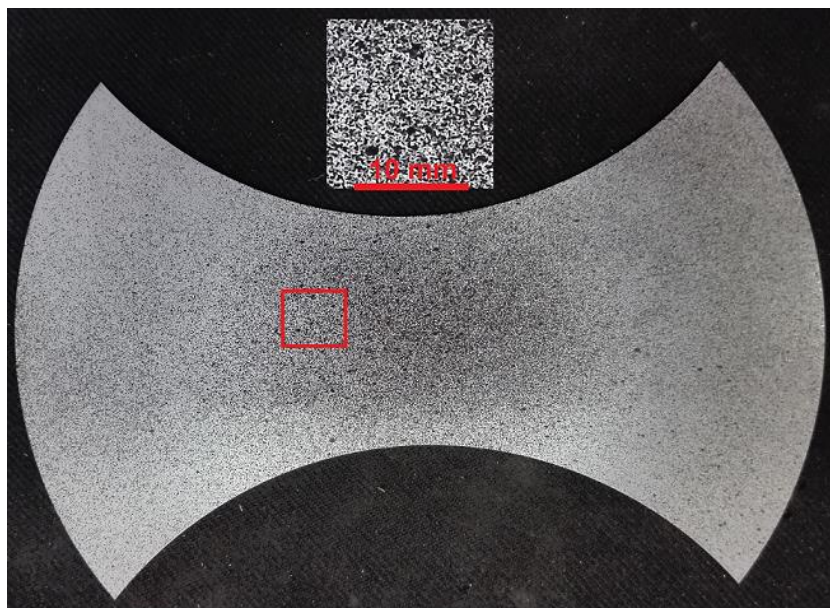


**Obr. 3.19** Vzorky pro měření FLC

**Tab. 11** Geometrie vzorků

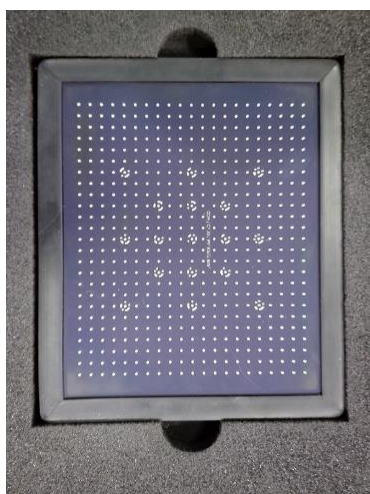
vzorek č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
šířka [mm]	30	45	60	90	105	120	130	210

Vzorky byly nejprve odmaštěny. Následně na ně byla nanesena bílá barva, po jejím částečném zaschnutí byl na vzorky za pomoci černé barvy nanesen takzvaný pattern, viz obrázek 3.20. Pattern umožňuje optickému systému Aramis sledovat deformaci vzorku, pattern se deformuje spolu s měřeným vzorkem.



**Obr. 3.20** Pattern pro měření FLC

Deformace byla měřena pomocí optického systému Aramis. Optický systém byl před měřením kalibrován pomocí kalibrační destičky, viz obrázek 3.21 a. Kalibrační destička byla v pracovním prostoru různě natáčena a byly snímány obrazy pomocí obou kamer, viz obrázek 3.21 b. Uspořádání pracoviště viz obrázek 3.22 a, počítač pro vyhodnocování nasnímaných dat viz obrázek 3.22 b. Frekvence snímání měřeného vzorku byla v průběhu měření z důvodu zmenšení množství dat měněna, nejprve byl vzorek snímán frekvencí 2 Hz, po přiblížení k mezním deformacím byl vzorek snímán vyšší frekvencí a to 12 Hz.



a)

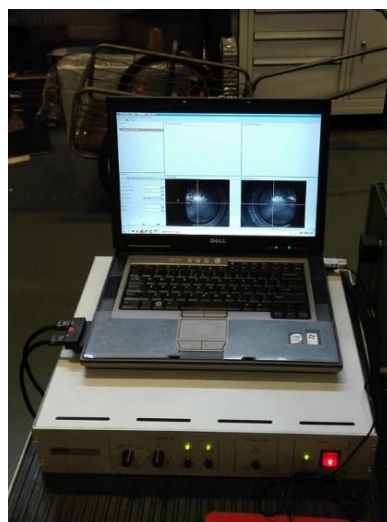


b)

**Obr. 3.21 a)** Kalibrační destička **b)** Kalibrace optického systému



a)



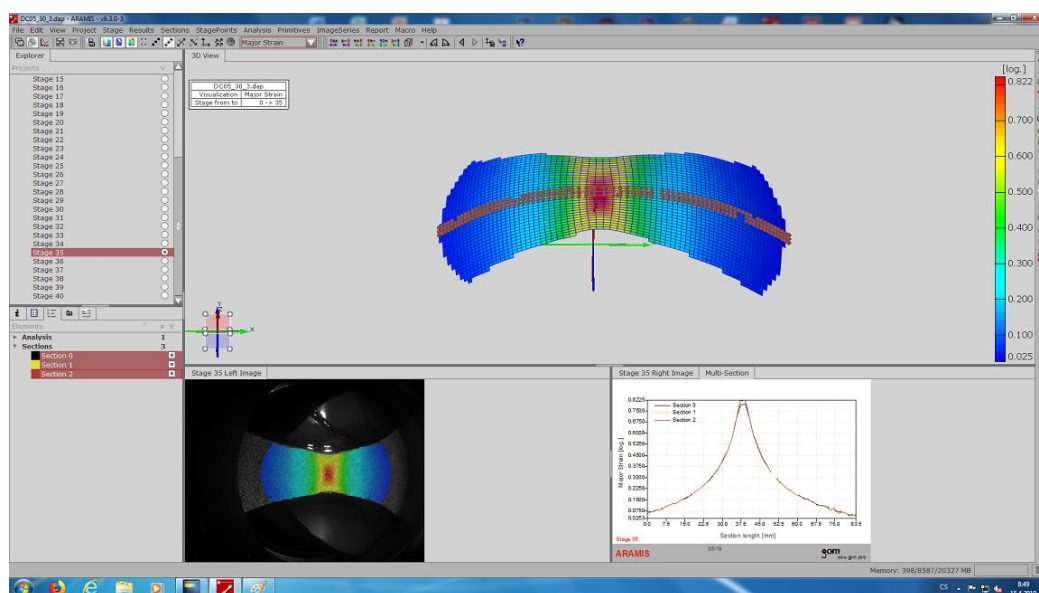
b)

**Obr 3.22. a) Optický systém Aramis b) PC pro komunikaci s kamerami**

Pro zmenšení tření bylo na vzorek nanесeno mazivo Mogul A00. Zároveň byla vložena mezi vzorek a tažník PTFE folie o tl. 0,2 mm. Následně byly vzorky pomocí polokulového tažníku vypínány až do vzniku praskliny.

### 3.5.1 Výsledky naměřených hodnot a jejich zpracování

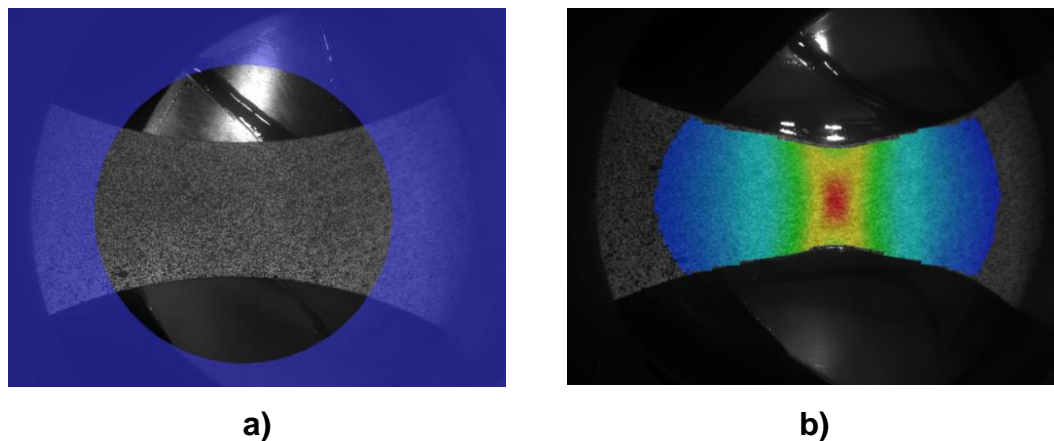
Vyhodnocení bylo provedeno v programu Aramis v6.3.0. Pracovní prostředí programu Aramis je na obrázku 3.23.



**Obr. 3.23 Pracovní prostředí Aramis**

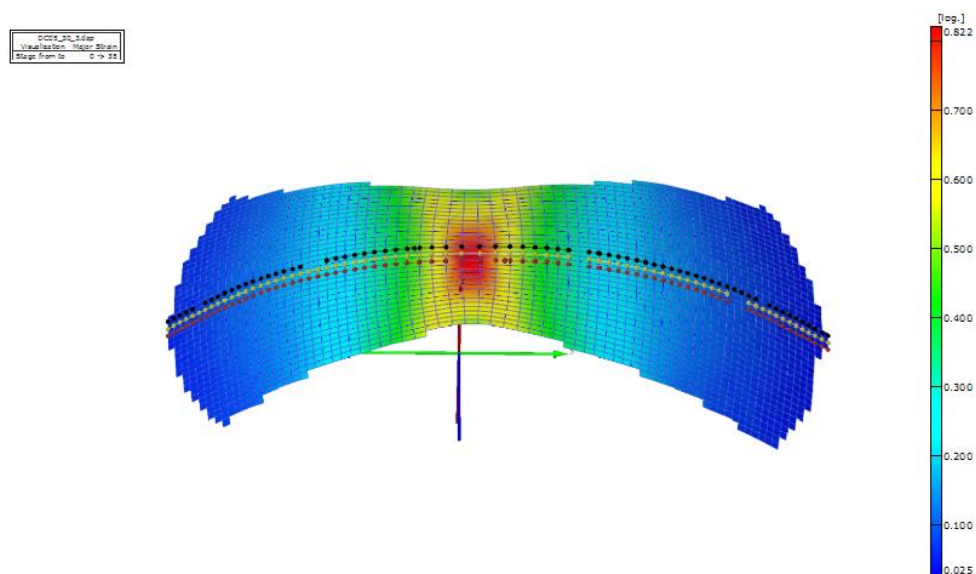


Nejprve byla vybrána oblast dat, viz obrázek 3.24 a, ve které byly následně spočteny hodnoty deformací, viz obrázek 3.24 b. Hodnoty deformací jsou počítány pouze do snímku, na kterém ještě není patrná trhlina. Jako příklad je uveden výpočet jednoho bodu FLC křivky a to pro materiál DC06 (OK) geometrie vzorku 30 mm.

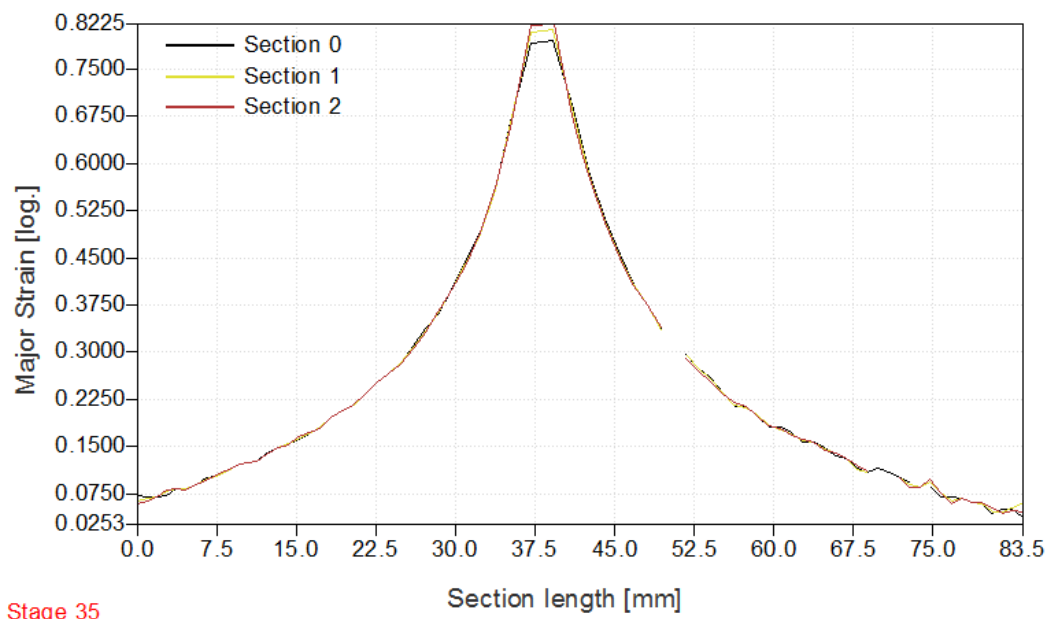


**Obr. 3.24** a) oblast výpočtu b) vypočítané hodnoty deformace

Po výpočtu hodnot deformací byly vybrány tři řezy po délce celého vzorku. Na těchto řezech je sledován průběh hlavní a vedlejší deformace. Příklad zvolených řezů je na obrázku 3.25. Průběh hlavní deformace pro jednotlivé řezy je znázorněn na obrázku 3.26. Stejný graf pro vybrané řezy je spočten i pro hodnoty vedlejší deformace.

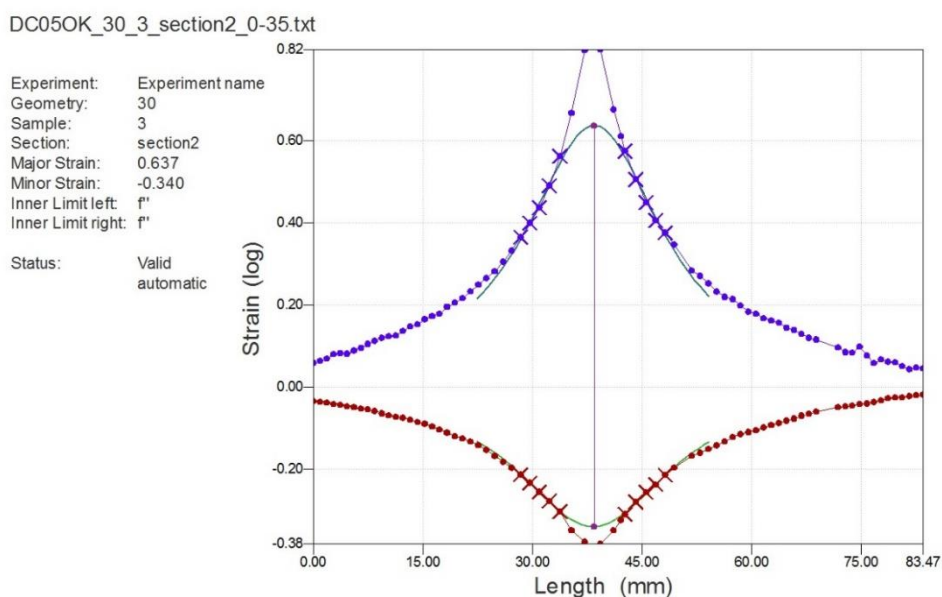


**Obr. 3.25** Vypočítané hodnoty deformace



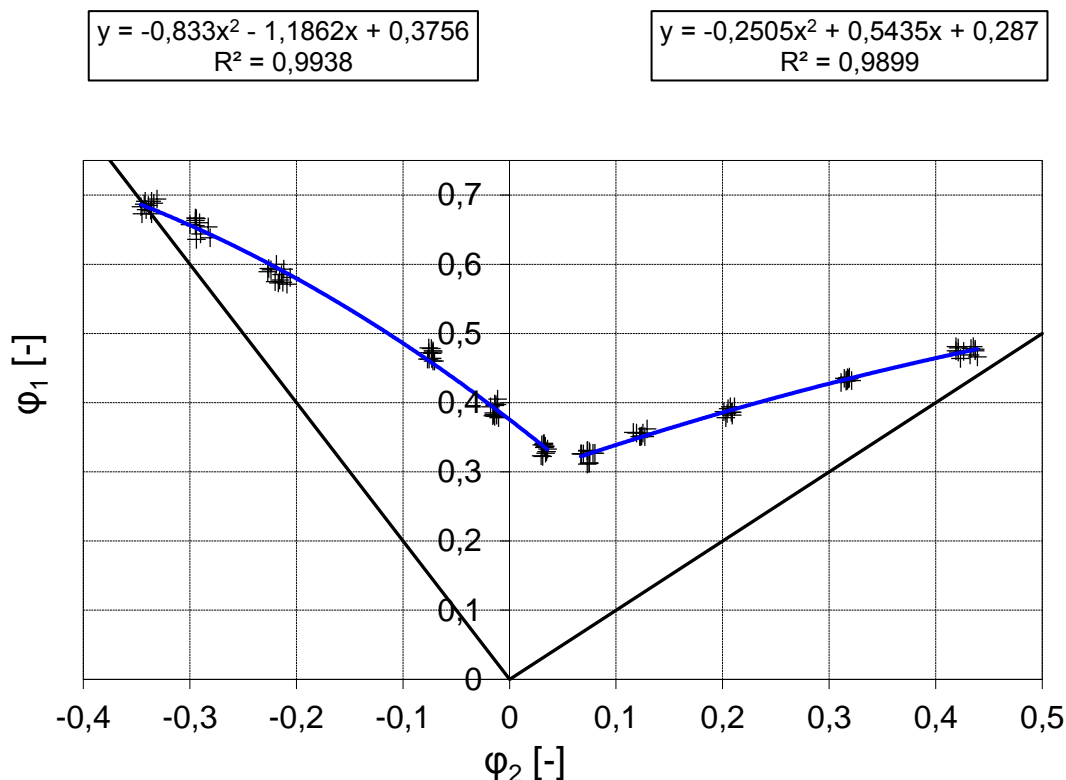
**Obr. 3.26** Průběh hlavní deformace pro jednotlivé řezy

Pro vykreslení FLC křivky nelze použít hodnotu maximální dosažené deformace, viz obrázek 3.27, respektive minimální deformace pro vedlejší deformaci, ale je nutné provést druhou derivaci vypočtených hodnot deformací a najít inflexní body. Po nalezení inflexních bodů je body pod inflexním bodem proložena inverzní parabola. Teprve vrchol této paraboly je hodnota deformace, kterou vynášíme do výsledného grafu. Tento výpočet je proveden automaticky v programu Aramis.



**Obr. 3.27** Regrese maximální hodnoty

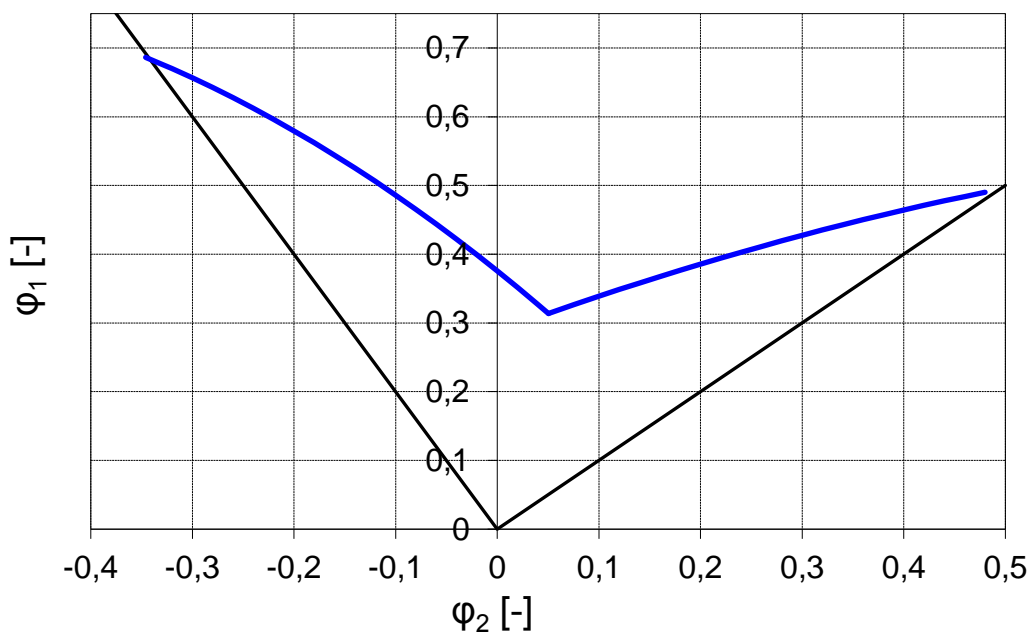
Naměřené body byly následně vyneseny do grafu, těmito body byl proložen polynom druhého stupně. Naměřené body a regresní křivky pro materiál DC06 (OK) jsou na obrázku 3.28.



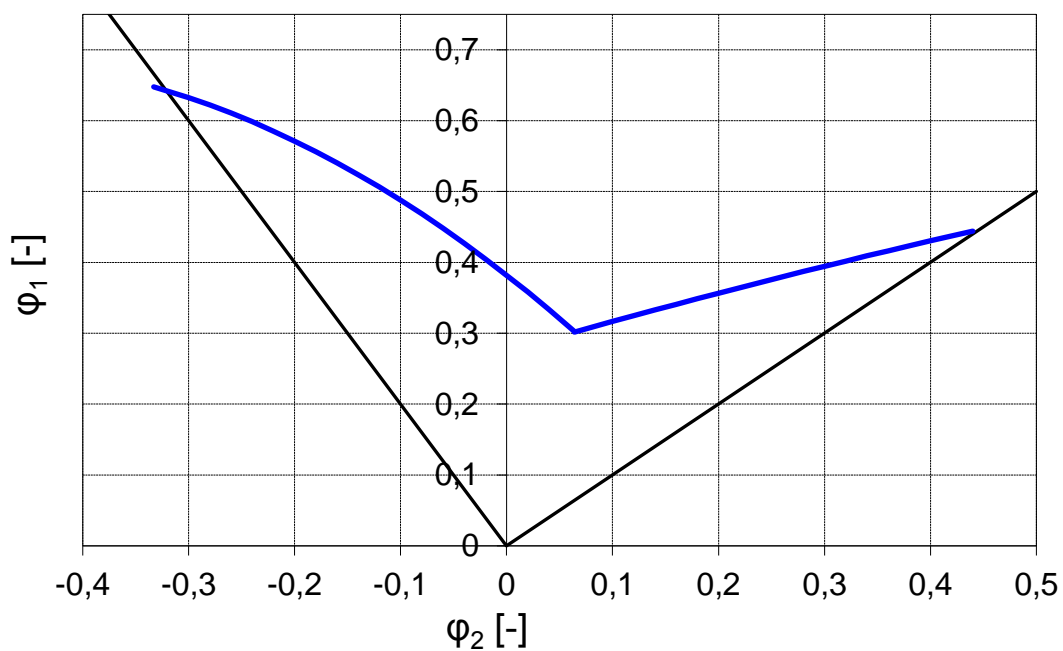
**Obr. 3.28** Naměřené body a regresní křivka

Následně byl vykreslen graf dle regresních křivek. Tento postup byl proveden pro všechny vzorky od obou zkoumaných materiálů. Na obrázku 3.29 je průběh FLC křivky pro materiál DC06 (OK) a pro materiál DC06 (NOK) viz obrázek 3.30.



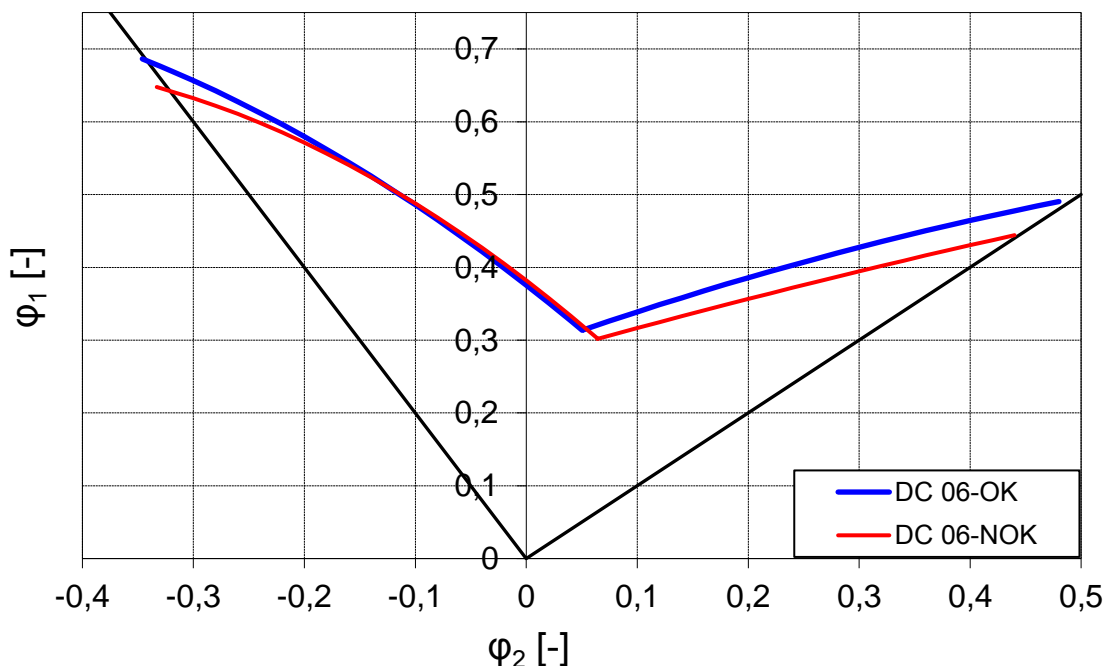


**Obr. 3.29** FLC DC06 (OK)



**Obr. 3.30** FLC DC06 (NOK)

Pro přehlednější porovnání obou materiálů byl sestrojen graf, kde jsou porovnány oba materiály, viz obrázek 3.31.

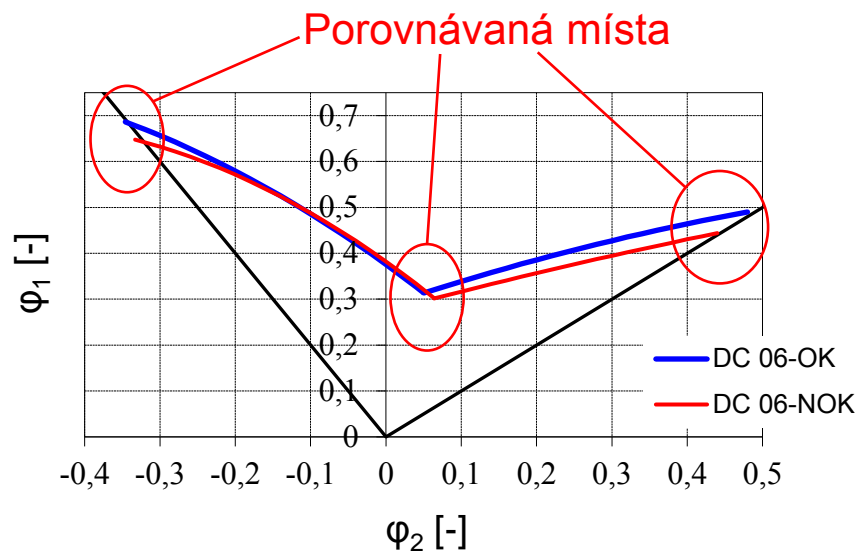


Obr. 3.31 Porovnání materiálů DCO (OK) a DC06 (NOK)

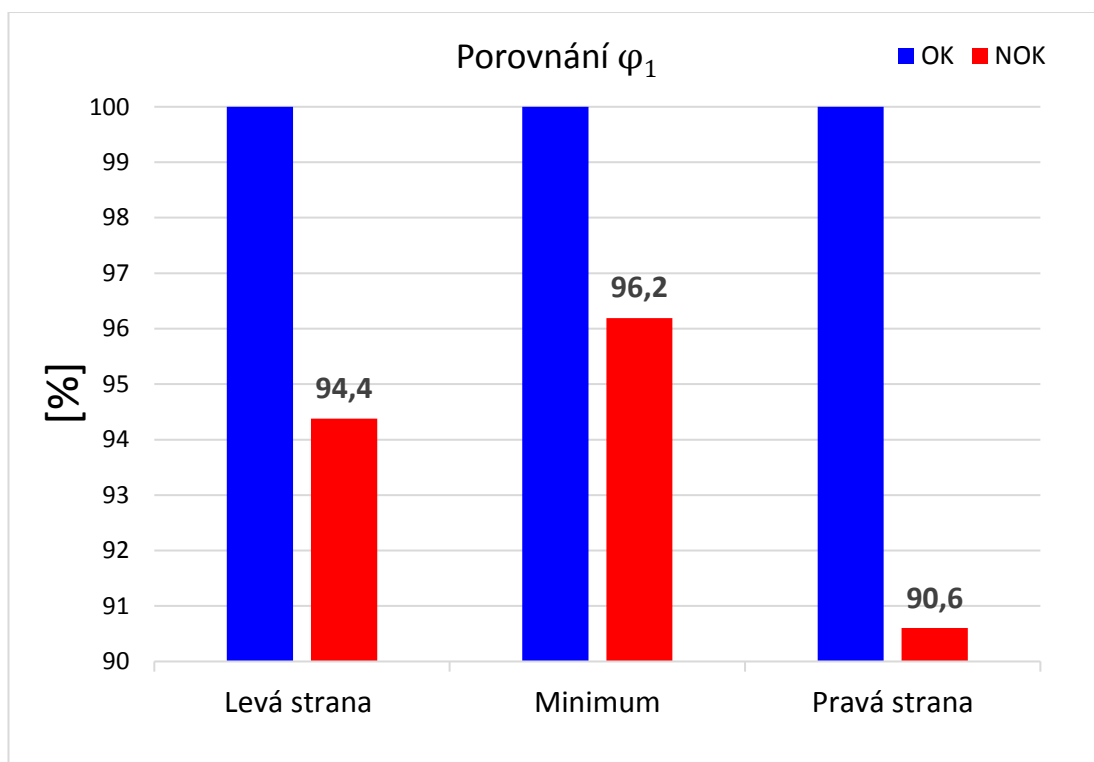
### 3.5.2 Diskuze k měření FLC křivek

Jak je patrné z grafu porovnávající obě FLC křivky, tak v levé části FLC křivky dosažené deformace na obou materiálech jsou téměř srovnatelné, až při přetvoření odpovídající jednoosému tahu vychází materiál DC06 (OK) lépe. V pravé části diagramu se rozdíl mezi materiály zvětšuje ve prospěch materiálu DC06 (OK), největší rozdíl je při napjatosti odpovídající rovnoosému vypínání.

Naměřené hodnoty FLC křivek byly porovnány ve třech oblastech a to v levé části, v oblasti minimální hlavní deformace  $\phi_1$  a v pravé části odpovídající rovnoosému vypínání, porovnávané oblasti jsou na obrázku 3.32. Byly porovnány dosažené hodnoty hlavní deformace  $\phi_1$ , z hodnot deformace v porovnávaných oblastech byl vypočten procentuální rozdíl, tento rozdíl je patrný z grafu na obrázku 3.33, materiál DC06 (OK) byl brán jako základ.



**Obr. 3.32** Porovnávaná místa FLC křivky



**Obr. 3.33** FLC Porovnání obou materiálů

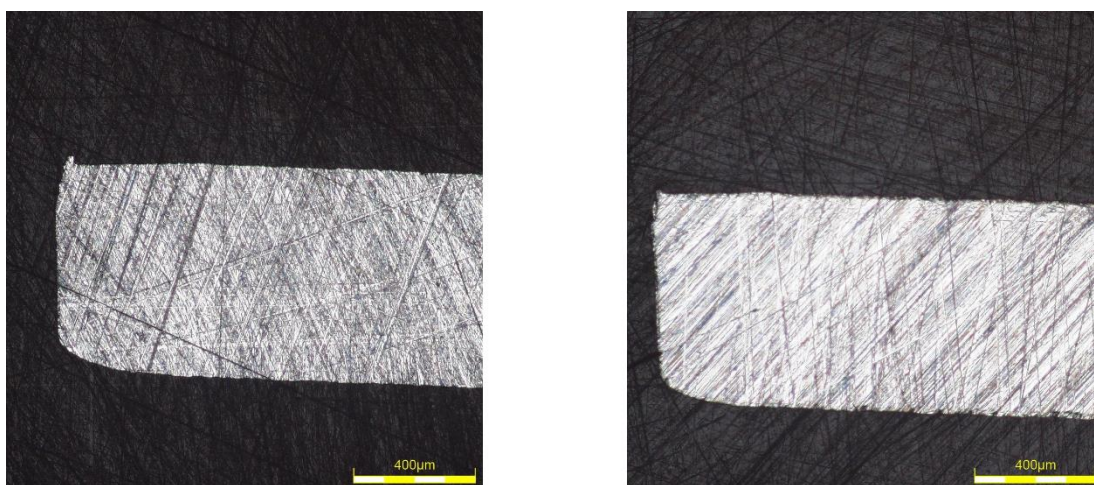
Jak je patrné z obrázku 3.33, tak v porovnávaných bodech vyšel vždy lépe materiál DC06 (OK), materiál DC06 (NOK) vychází hůře a to o 5,6 % v levé části, v oblasti minima o 3,8 % a o 9,4 % v pravé části diagramu.

### 3.6 Metalografie

U obou materiálů byly vytvořeny výbrusy pro porovnání tvaru střížné hrany pro různé střížné mezery. Velikosti střížných mezer byly 1, 10, 20, 30, 40 a 50 % z tloušťky stříhaného materiálu. Vzorky byly nejprve vystříženy na lisu. Následně byly pomocí metalografické pily rozřezány na vhodný rozměr, ustaveny do formy a zality dentacrylem. Po vytvrzení dentacrylu, byly vzorky lehce zbroušeny do roviny, aby nedošlo k poškození střížné hrany. Následně byly vzorky nafoceny pomocí optického mikroskopu při 150 násobném zvětšení. Pro hodnocení struktury byl u obou materiálů zároveň vytvořen jeden vyleštěný a naleptaný vzorek nitalem.

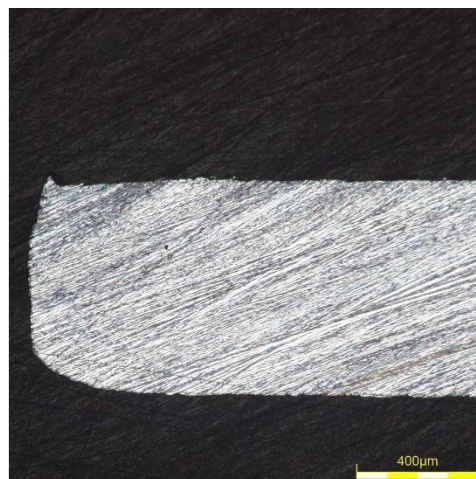
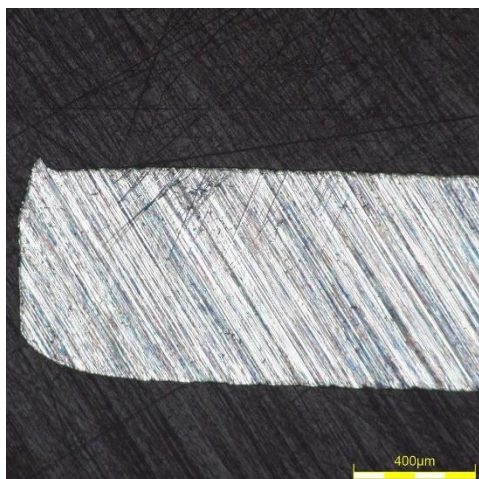
#### 3.6.1 Vyhodnocení a diskuze metalografie

Pro porovnání střížných hran byly dány fotografie výbrusů do dvojic, vždy na levé straně je materiál DC06 (OK) a na pravé DC06 (NOK). Výbrusy viz obrázky 3.34 až 3.39.

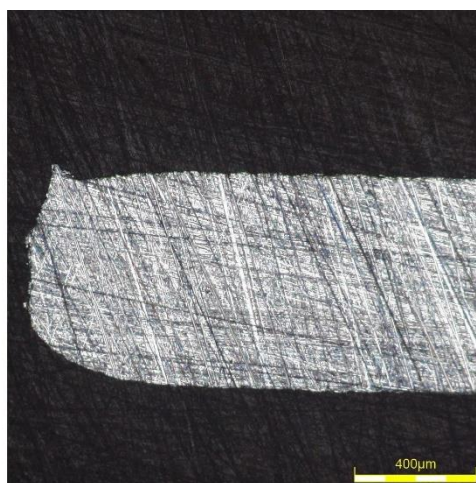
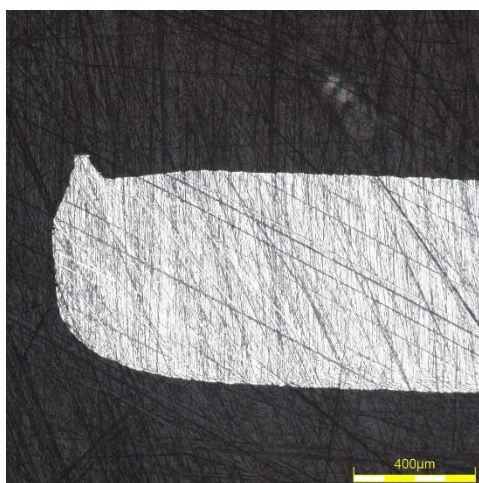


**Obr. 3.34** 1 % Střížná mezera

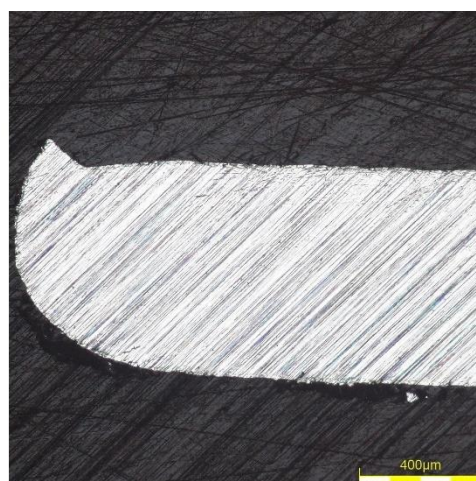




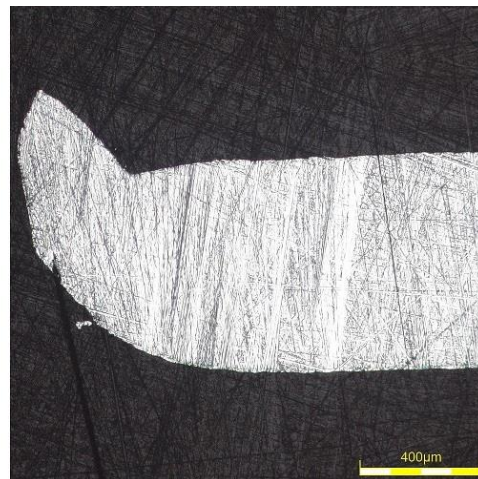
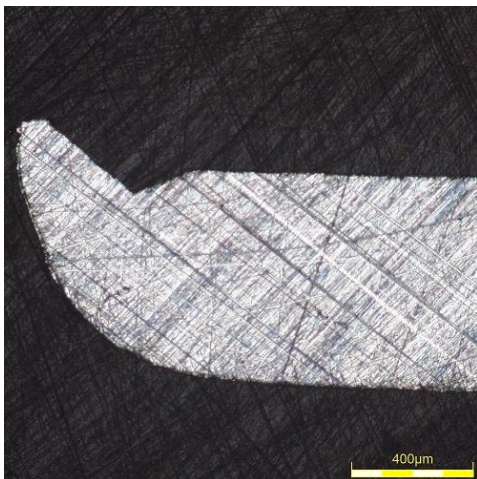
**Obr. 3.35** 10 % Střižná mezera



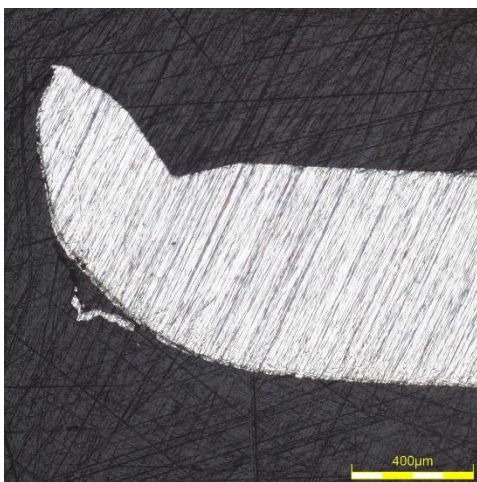
**Obr. 3.36** 20 % Střižná mezera



**Obr. 3.37** 30 % Střižná mezera



**Obr. 3.38** 40 % Střižná mezera

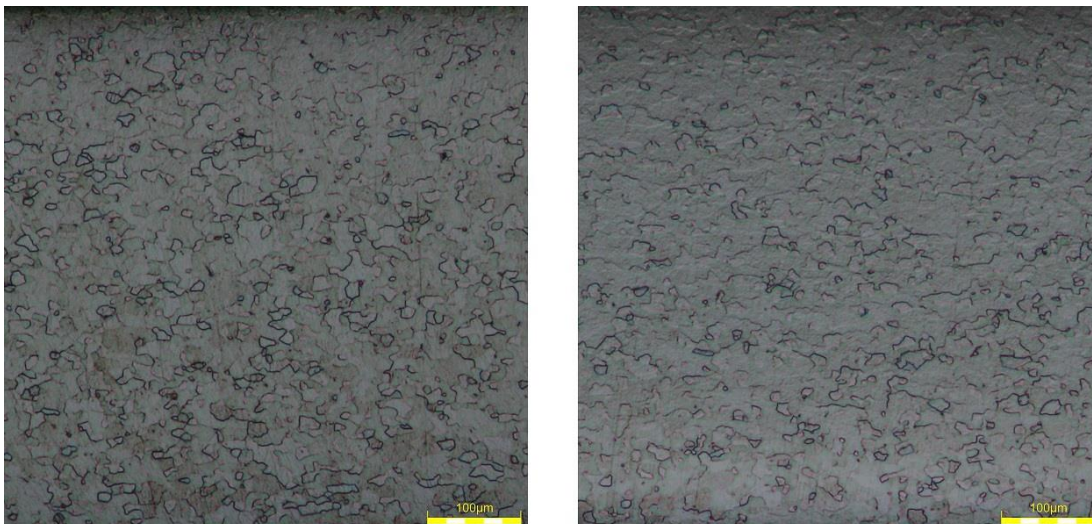


**Obr. 3.39** 50 % Střižná mezera

Jak je patrné z předchozích obrázků 3.34 až 3.39, tak není žádný patrný rozdíl ve tvaru střižné hrany mezi porovnávanými materiály.

Vzorky, které byly leštěné a leptané pro pozorování struktury jsou na obrázku 3.40, v levé části je materiál DC06 (OK) a v pravé DC06 (NOK).





**Obr. 3.40** Struktura materiálů

Z obrázků je patrné, že u obou testovaných vzorků se jedná o čistě feritickou strukturu se srovnatelnou velikostí zrna.

## 4 Závěr

V rámci řešení předkládané diplomové práce byla provedena komplexní analýza mechanických vlastností dvou testovaných materiálů s označením DC06 ZE50/50 BPO s cílem prokázání vlivu kolísání mechanických vlastností na lisovatelnost rámu vozu Škoda Karoq. Materiál označovaný jako DC06 (NOK) byl vyřazen z výroby z důvodu vzniku nadměrného počtu vad. Pro provedení komplexní analýzy mechanických vlastností bylo zvoleno široké portfolio normalizovaných i technologických zkoušek. Způsob provedení, vyhodnocení a diskuze výsledků k jednotlivým provedeným zkouškám jsou podrobně uvedeny v experimentální části diplomové práce v kapitole 3. I přes to, že výsledky měření neprokázaly na první pohled zjevné rozdíly v mechanických vlastnostech u obou testovaných materiálů a naměřené hodnoty splňují všechna interní i normou daná kritéria, je vidět, že materiál označovaný jako DC06 (NOK) vykazuje ve všech parametrech horší hodnoty oproti materiálu DC06 (OK), což prokázaly i provedené statistické testy na hladině významnosti  $\alpha = 5 \%$ . Je otázkou, zda kombinace všech nepatrně horších sledovaných parametrů u materiálu DC06 (NOK) může vést k tak zásadním problémům ve výrobě majících ve svém důsledku vliv na konečné vyřazení tohoto materiálu z výroby. Pro objektivní posouzení tohoto vlivu navrhuji provést další testy v širším rozsahu, popř. zavedení dalších pomocných ukazatelů pro komplexní hodnocení lisovatelnosti daného dílu.



## Seznam použité literatury

- [1] FOREJT M.: *Teorie obrábění, tváření a nástroje*, vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, ISBN80-214-2374-9
- [2] BAREŠ, K. *Lisování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971. 542 s.
- [3] LENFELD, P. *Technologie II*, [online]. [cit. 2.1. 2019] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/09.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm)
- [4] JANOVEC, J. *Perspektivní materiály*. 3 vydání Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [5] DVOŘÁK M., GAJDOŠ F.: *Technologie tváření plošné a objemové tváření*, vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9
- [6] ČSN ISO 10113 *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 16s. Třídící znak: 420435
- [7] ČECHLOVSKÝ, J. *Zjištění změny tvrdosti (mikrotvrdosti) v závislosti na deformaci materiálu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.
- [8] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310
- [9] BUCHAR, Z. *Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubotažných plechů*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1987. Disertace. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jaroslav Tměj
- [10] BUCHAR, Z. *Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů: [Circle grid analysis of irregular shape sheet metal stamped parts]*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1996. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [11] ARGUS | GOM. *Precise Industrial 3D Metrology | GOM* [online]. [cit. 8. 3. 2019] Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/argus.html>
- [12] MCAE Systems,s.r.o. [online]. [cit. 6. 3. 2019] Dostupné z: <https://www.mcae.cz/kategorie/deformacni-systemy/>

- [13] ČSN EN 10152 *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena - Technické dodací podmínky* Praha: Český normalizační institut, 1996. 20s. Třídící znak 42 0911
- [14] NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M., KŘÍŽ, O. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. 2. rozš. vydání. Praha: Grada, 2016. s. 278. ISBN 978-80-247-5786-5

## Seznam příloh

- A - Protokoly ze zkoušky tahem
  - A1.1 DC06 - (OK)\_0°
  - A1.2 DC06 - (OK)\_45°
  - A1.2 DC06 - (OK)\_90°
  - A2.1 DC06 - (NOK)\_0°
  - A2.2 DC06 - (NOK)\_45°
  - A2.3 DC06 - (NOK)\_90°
- B - Technický list C-Sol
- C - Protokoly měření tření
  - C1 DC06 - (OK)
  - C1 DC06 - (NOK)

A1.1 DC06 - (OK)  $0^\circ$

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

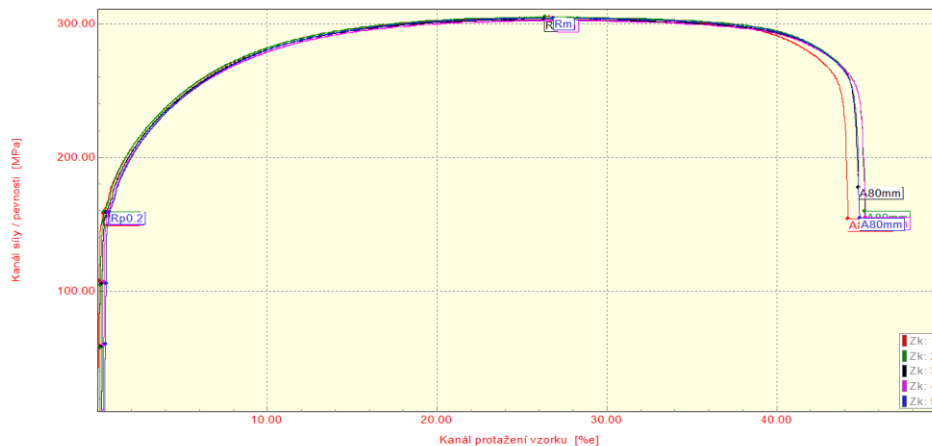
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (OK)  
 Směr odebrání vzorku :  $0^\circ$   
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	158.1	304.4	26.35	44.07
2	159.2	304.9	26.07	44.98
3	158.7	303.2	25.89	44.48
4	158.5	302.4	26.56	44.84
5	158.9	304.1	26.21	44.37

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	158.7	303.8	26.22	44.55
Směrodatná odchylka	0.4	1.0	0.26	0.36
Minimální hodnota	158.1	302.4	25.89	44.07
Maximální hodnota	159.2	304.9	26.56	44.98



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

A1.2 DC06 - (OK)<sub>45°</sub>

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

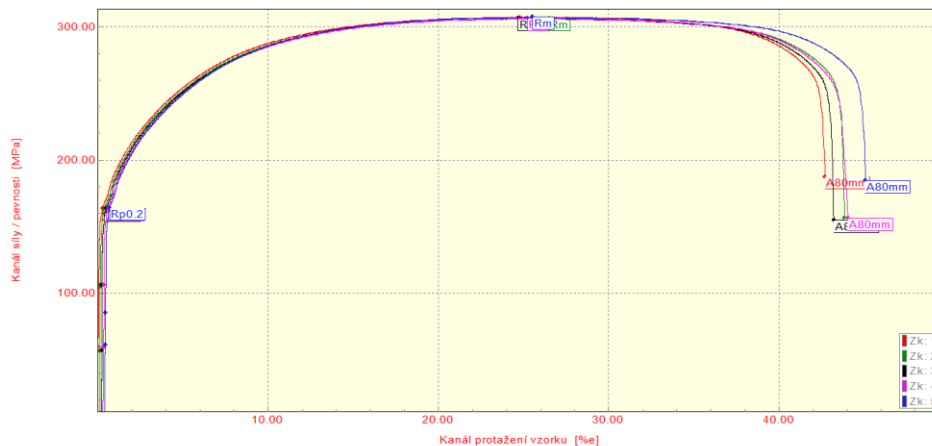
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (OK)  
 Směr odebrání vzorku : 45°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	164.0	307.1	24.60	42.60
2	163.3	306.3	26.22	43.68
3	163.4	306.3	24.30	42.94
4	163.6	306.4	24.75	43.64
5	164.1	307.4	24.93	44.58

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	163.7	306.7	24.96	43.49
Směrodatná odchylka	0.4	0.5	0.74	0.76
Minimální hodnota	163.3	306.3	24.30	42.60
Maximální hodnota	164.1	307.4	26.22	44.58



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

A1.2 DC06 - (OK)<sub>90°</sub>

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

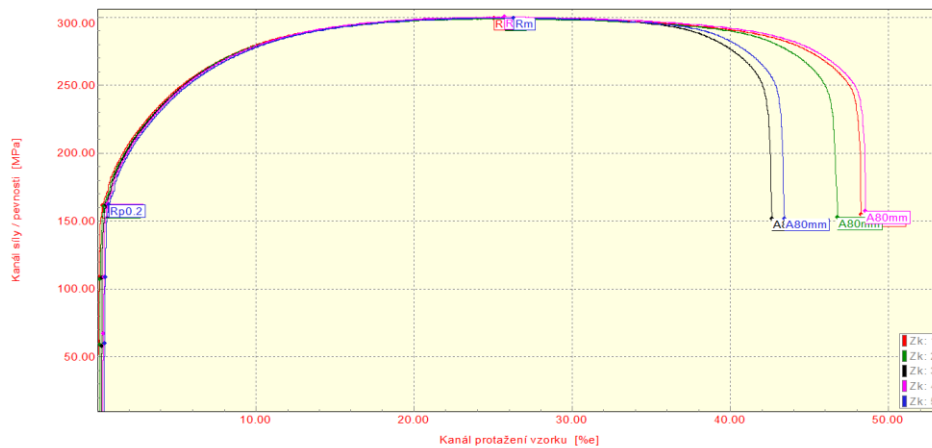
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (OK)  
 Směr odebrání vzorku : 90°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	161.6	299.8	24.83	48.16
2	161.1	299.3	25.47	46.58
3	161.9	299.9	25.37	42.32
4	162.4	300.4	25.21	48.15
5	161.8	299.7	25.71	42.91

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	161.8	299.8	25.32	45.62
Směrodatná odchylka	0.5	0.4	0.33	2.83
Minimální hodnota	161.1	299.3	24.83	42.32
Maximální hodnota	162.4	300.4	25.71	48.16



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

A2.1 DC06 - (NOK)\_0°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

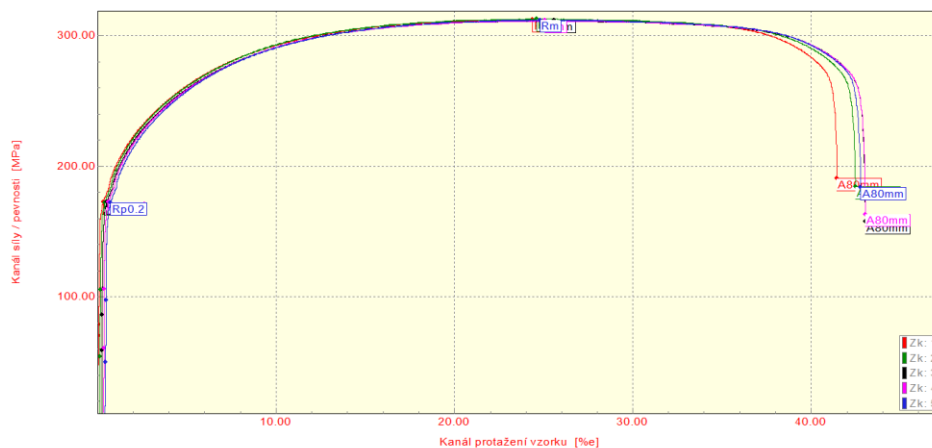
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (NOK)  
 Směr odebrání vzorku : 0°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	172.6	312.6	24.17	41.30
2	172.1	312.9	24.31	42.26
3	172.5	311.6	25.19	42.76
4	172.9	311.6	24.58	42.65
5	171.9	312.1	24.18	42.26

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	172.4	312.1	24.49	42.25
Směrodatná odchylka	0.4	0.6	0.42	0.57
Minimální hodnota	171.9	311.6	24.17	41.30
Maximální hodnota	172.9	312.9	25.19	42.76



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

A2.2 DC06 - (NOK)\_45°

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

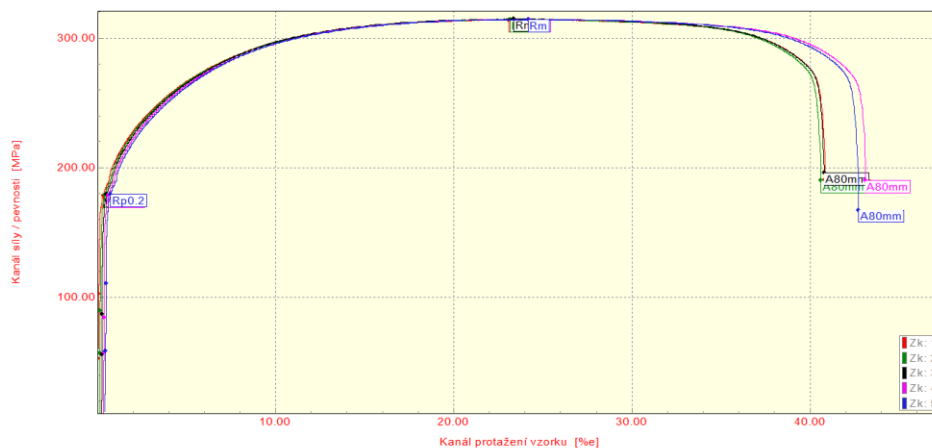
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (NOK)  
 Směr odebrání vzorku : 45°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	178.7	314.1	22.91	40.76
2	178.9	314.3	22.89	40.41
3	179.3	314.7	23.01	40.49
4	178.7	314.5	23.76	42.73
5	179.3	314.5	23.55	42.22

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	179.0	314.4	23.22	41.32
Směrodatná odchylka	0.3	0.2	0.40	1.07
Minimální hodnota	178.7	314.1	22.89	40.41
Maximální hodnota	179.3	314.7	23.76	42.73



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ



A2.3 DC06 - (NOK)<sub>90°</sub>

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

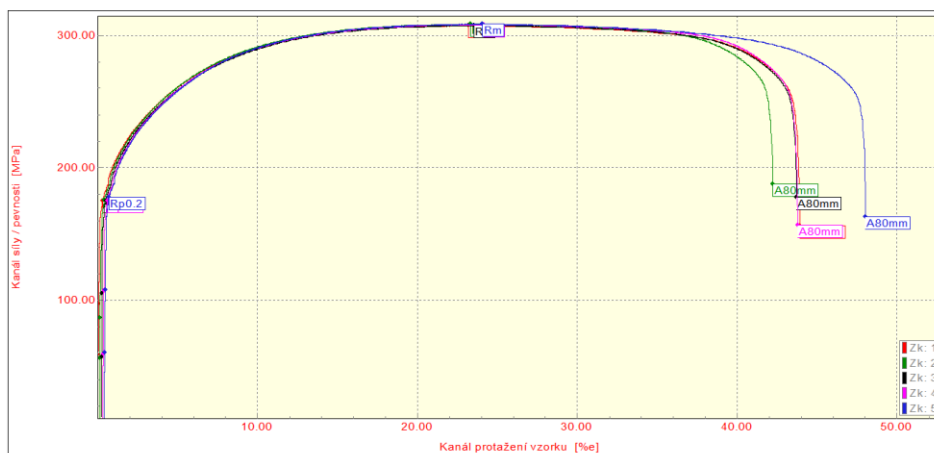
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC06 ZE 50/50 BPO (NOK)  
 Směr odebrání vzorku : 90°  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.  
 Vypracoval : Bc. Jan Čechlovský  
 Datum provedení testu : 15.2.2019  
 Pozn. : ---

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	175.5	307.4	23.02	43.84
2	175.8	308.4	23.02	42.03
3	175.5	307.5	23.14	43.42
4	175.4	308.3	23.67	43.39
5	177.6	308.5	23.48	47.54

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	176.0	308.0	23.27	44.04
Směrodatná odchylka	1.0	0.5	0.29	2.07
Minimální hodnota	175.4	307.4	23.02	42.03
Maximální hodnota	177.6	308.5	23.67	47.54



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

B - Technický list C-Sol



## C-sol (Extra)

<b>Popis:</b>	kapalina C-sol Extra je směsí ropných uhlovodíků bez obsahu halogenů	
<b>Použití:</b>	k bezoplachovému odmašťování a čištění dílů za studena v postřikových, máčecích nebo ručních strojích, ideální pro opravy, údržby, průmyslové provozy s hrubším znečištěním, pro mytí elektrických dílů a zařízení	
<b>Vlastnosti:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ vynikající čisticí schopnost</li><li>➤ účinnost na většinu olejů, tuků, vazelin a vosků</li><li>➤ vyhovující odpařivost</li><li>➤ nepoškozuje čistěný povrch</li><li>➤ nezpůsobuje korozi materiálů</li><li>➤ ideální pro ocel, hliník, zinek, měď, titan</li><li>➤ vysoká sytnost</li><li>➤ zasychá bez map</li><li>➤ obsah aromátů do 0,03 % hm</li><li>➤ minimální zatížení ovzduší</li></ul>	
<b>Parametry:</b>	bod vzplanutí	63 °C
	hustota při 15°C	790 kg/m³
	viskozita při 25°C	1,23 mm²/s
	třída hořlavosti	III.
<b>Balení:</b>	50 l, 160 l, 200 l	
<b>Likvidace:</b>	společnost QTS CZ s.r.o. garantuje na území ČR výměnu a odvoz použité náplně	

QTS CZ s.r.o.  
Kydlinovská 245  
503 01 Hradec Králové  
www.qts.cz

Tel.: 602 412 577  
495 532 763  
prodej@qts.cz

C1 DC06 - (OK)



## Technische Universität in Liberec Lehrstuhl für Maschinentechnologie

### Tribologie - Streifenziehtest

#### Eintrittswerte

Getesteter Schmierstoff: : Anticorit PL 3802-39LV

Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m<sup>2</sup>

Getestetes Substrat : DC06 (OK)

Oberflächenrauheit : Ra=1,304/1,218 µm Rp=92/86 1/cm

Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet

Kontaktdruck : 8 - 23 - 38 - 53 - 68 - 83 MPa

Stoßfläche : 20 mm x 20 mm

Schubgeschwindigkeit : 1 mm/s

Variante : 1B

Temperatur : 40°C

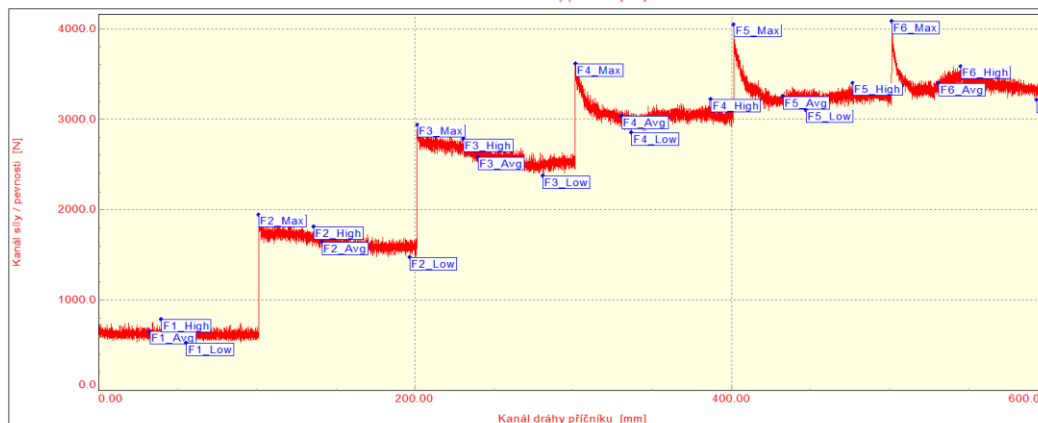
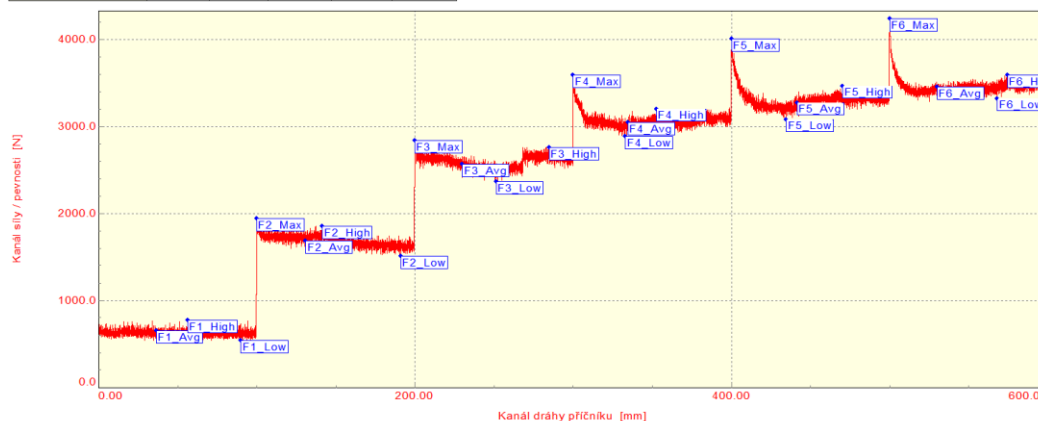
Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz

Messstrecke : 600 mm

#### Schlusswerte

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	4242	3456	3590	3323	267
2	4084	3397	3583	3211	373
3	3897	3280	3428	3132	296
4	3850	3162	3322	3002	320

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	4	4	4	4	4
Průměrná hodnota	4018	3324	3481	3167	314
Směrodatná odchylka	180	130	129	135	45



C2 DC06 - (NOK)



## Technische Universität in Liberec Lehrstuhl für Maschinentechnologie

### Tribologie - Streifenziehtest

#### Eintrittswerte

Getesteter Schmierstoff: : Anticorit PL 3802-39LV

Schmierstoffmenge : 1,5±0,1 g/m2

Getestetes Substrat : DC06 (NOK)

Oberflächenrauheit : Ra=1,552/1,489 µm RPc=65/68 1/cm

Werkzeugmaterial : GGG 70L - gehärtet

Kontaktdruck : 8 - 23 - 38 - 53 - 68 - 83 MPa

Stoßfläche : 20 mm x 20 mm

Schubgeschwindigkeit : 1 mm/s

Variante : 1B

Temperatur : 40°C

Aufnahmegeschwindigkeit : 2 kHz

Messstrecke : 600 mm

#### Schlusswerte

Zkouška	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
1	4561	3857	4027	3687	341
2	4571	3871	4083	3660	423
3	4495	3795	3953	3637	316
4	4561	3789	3969	3610	359

Statistika	F6_Max N	F6_Avg N	F6_High N	F6_Low N	delta_F6 N
Počet zkoušek	4	4	4	4	4
Průměrná hodnota	4547	3828	4008	3648	360
Směrodatná odchylka	35	42	59	33	46

